

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu

Jukka Koskenranta

Loviisan ydinvoimalaitoksen käytettävyyssanalyysi
huomioiden suuret riskit

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelmassa.

Espoo, 10. syyskuuta 2015

Työn valvoja: Professori Ahti Salo
Työn ohjaaja: TkL Kalle Jänkälä

*Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osin kaikki
oikeudet pidätetään.*

Aalto-yliopisto Perustieteiden korkeakoulu		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ
Tekijä: Jukka Koskenranta		
Työn nimi: Loviisan ydinvoimalaitoksen käytettävyyssanalyysi huomioiden suuret riskit		
Title in English: Availability analysis of Loviisa nuclear power plant considering major risks		
Tutkinto-ohjelma: Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma		
Pääaine: Systeemi- ja operaatiotutkimus	Sivuaaine: Energiatekniikka	
Opetusyksikön (ent. professuuri) koodi: Mat-2		
Työn valvoja: Professori Ahti Salo	Työn ohjaaja: TkL Kalle Jänkälä	
<p>Loviisan ydinvoimalaitos kuuluu ydinvoimalaitosten parhaaseen neljännekseen käyttökertoimella mitattuna. Tästä syystä tavanomaisen vuoden käytettävyyttä on vaikea parantaa. Käyttökerroin on tämän työn päämittari käytettävyydelle. Käyttökertoimessa verrataan tuotettua energiaa tuotettavissa olevaan energiaan, nimelliseen energiaan. Suuret käytettävyyssriskit aiheuttavat pitkiä seisokkeja, tässä työssä tunnistetuista lähes kaikki aiheuttavat yli kuukauden seisokin. Vakavimmat suuret käytettävyyssriskit aiheuttavat voimalaitoksen pysyvän sulkemisen. Suuret käytettävyyssriskit tapahtuvat niin harvoin, ettei niiden analyysiä voi perustaa pelkästään ydinvoimalaitoksen omaan historiaan.</p> <p>Tämän diplomityön tarkoituksena ja siitä saatavana hyötynä on erityisesti tieto suurista käytettävyyssriskeistä ja niiden merkityksestä. Työssä ei pelkästään arvioida suuria riskejä, koska tulosten arvioiminen ja vertaaminen muihin tutkimuksiin on helpompaa, kun käytettävyyden arvioinnissa on mukana myös yleisimmät käytettävyyssriskit. Tässä diplomityössä suurten käytettävyyssriskien analyysi rajataan Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n yhteydessä tunnistettuihin riskeihin ja alkutapahtumiin. Yleisten tuotantotappioiden analyysi rajataan Loviisan ydinvoimalaitoksen tuotantotappiohistoriaan.</p> <p>Yleisten tuotantotappioiden malli Loviisan ensimmäiselle ydinvoimalaitosyksikölle (Lo1) luodaan Miriam RAM Studio -ohjelmistoa käyttäen. Suuret käytettävyyssriskit lasketaan analyttisesti arvioitujen keskimääräisten vikaantumis- ja korjausajojen perusteella. Vikaantumisaikat arvioidaan Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:ssa käytetyillä menetelmillä. Korjausajat saadaan pääasiassa asiantuntija-arvioista.</p> <p>Malli ennusti Lo1:n käyttökertoimeksi tavanomaiselle käyttövuodelle 93,15 % ja loppukäyttöiälle keskimäärin 90,75 %. Merkittävimpänä tuloksena havaittiin, että työssä käytetyillä menetelmillä pystytään arvioimaan suurten käytettävyyssriskien vaikutusta käytettävyyteen ja käytettävyyssarviot olivat edelleen optimistisia, koska mallissa ei ole mukana kaikkia potentiaalisia käytettävyyssriskejä. Suurin yksittäinen tuotantotappio oli vuosihuolto. Vuosihuollon jälkeen merkittävimmät tuotantotappiot aiheutuivat paloista ja erityisesti sähkötilojen paloista. Tästä syystä paloturvallisuuteen on syytä kiinnittää huomiota Loviisan ydinvoimalaitoksella. Ennen käytännön sovelluksia on suositeltavaa laajentaa ja tarkentaa mallia.</p>		
Päivämäärä: 10.09.2015	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 7 + 109
Avainsanat: Käytettävyys, käyttökerroin, tuotantotappio, ydinvoima, suuri käytettävyyssriski, PRA, PSA, ydinturvallisuus		

Aalto University School of Science		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Jukka Koskenranta			
Title: Availability analysis of Loviisa nuclear power plant considering major risks			
Title in Finnish: Loviisan ydinvoimalaitoksen käytettävyyssanalyysi huomioiden suuret riskit			
Degree Programme: Engineering Physics and Mathematics			
Major subject: Systems and Operations Research		Minor subject: Energy Technology	
Chair (code): Mat-2			
Supervisor: Professor Ahti Salo		Instructor: Kalle Jänkälä, Lic.Sc (Tech.)	
<p>Loviisa nuclear power plant is among the best 25 % percent of nuclear power plants by load factor. Because of high load factor, it is difficult to improve load factor of a normal year. Load factor is the main measure of availability in this thesis. Load factor compares produced energy to reference energy. Major availability risks can cause long outages. In this thesis almost all considered major risks cause outage duration one month or longer. Longest considered outage durations in this thesis are rest of the working life of the power plant. Major availability risks happen so rarely that one cannot analyze them only with history of one nuclear power plant.</p> <p>The purpose and benefit of this master's thesis is to provide knowledge about major availability risks and their importance. In this thesis, we do not consider only major risks, because analyzing and comparing results with other analyses is easier if we consider also common availability risks. In this thesis, we limit major availability risks to risks identified in probabilistic risk assessment (PRA) of Loviisa nuclear power plant and to initiating events of the PRA. We limit the analysis of common availability risks to Loviisa nuclear power plant operation history including only failures which have caused outages.</p> <p>We generate common availability model of Loviisa 1 nuclear unit (Lo1) using Miriam RAM Studio, a tool for reliability, availability and maintainability analysis. We compute numerical results of major availability risks using analytic equations without a dedicated program for availability analysis. Analytic availability analysis relies on time values mean time to failure (MTTF) and mean time to repair (MTTR). We estimate MTTFs applying the methods used in the Loviisa PRA. We derive MTTRs mainly based on expert judgments.</p> <p>Common availability risk analysis predicts 93.15 % load factor for a normal year of Lo1. Major availability risk analysis predicts 90.75 % mean load factor for the rest lifetime of Lo1. The most significant result in the thesis is that the applied methods can be used to evaluate major availability risks. Comparison with other analyses shows that results for both common and major availability risks are optimistic mainly because we do not consider all possible availability risks. The most significant factor in estimated load factor is planned annual maintenance. The second most significant availability risk is fires and especially fires in electric equipment rooms. As a result we recommend to pay attention to fire safety in Loviisa nuclear power plant. Before practical applications we recommend to complement and improve accuracy of the analysis.</p>			
Date: 10.09.2015		Language: Finnish	
		Number of pages: 7+109	
Keywords: Availability, load factor, outage, nuclear power, major availability risk, PRA, PSA, nuclear safety			

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Fortum Power and Heat Oy:ssä ydinturvallisuusosaston PRA-ryhmässä. Työ aloitettiin vuoden 2015 alussa ja sitä tehtiin syyskuuhun 2015 asti. Ensimmäisenä haluan kiittää työn ohjaajaa TkL. Kalle Jänkälää mielenkiintoisesta aiheesta ja hyvistä kommentteista kaikkiin työtä koskeviin kysymyksiin! Aloitin PRA-ryhmässä kesätoissa vuonna 2014 ja tuntuu, että tämä työ yhdistää sopivasti pää- ja sivuainetta sekä kaikkea sitä mitä olen oppinut Fortumilla.

Kiitos myös työn valvojalle professori Ahti Salolle. Ahti auttoi sopivasti, mutta antoi myös vapauksia. Kiitos myös avopuolisolleni Jennille tuesta työn aikana, vaikka myös itse teit lopputyötä samaan aikaan.

Kiitos kuuluu myös Fortumin koko PRA-ryhmälle. Autoitte asiakysymyksissä sekä olitte osana hyvää työilmapiiriä. Kiitokset myös Fortumin Thermal Production and Power Solutions –yksikön Maintenance development –ryhmälle. Teidän avulla sain käyttöön Miriam RAM Studion sekä arvokasta ohjeistusta. Kiitokset myös monille Loviisan ydinvoimalaitoksen työntekijöille, joiden kanssa olin yhteydessä työn tiimoilta.

Espoossa, 10. syyskuuta 2015.

Jukka Koskenranta

Sisällysluettelo

Esipuhe.....	iii
Lyhenteet ja sanasto.....	vi
Luku 1 Johdanto.....	1
1.1 Tavoitteet ja sisältö.....	3
1.2 Rajaukset.....	4
Luku 2 Loviisan ydinvoimalaitos	5
2.1 Yleiskuvaus.....	5
2.2 Käyttö ja kunnossapito.....	10
2.3 Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi.....	16
Luku 3 Käytettävyys.....	20
3.1 Käytettävyyden mittarit.....	21
3.1.1 Tuotantotaikaan perustuvat käytettävyysmittarit.....	23
3.1.2 Tuotettuun energiaan perustuvat käytettävyysmittarit.....	24
3.1.3 Tapahtumamääriin perustuvat käytettävyysmittarit.....	28
3.2 Kirjallisuuskatsaus käytettävyysanalyyseistä.....	28
3.3 Analyttinen käytettävyyslaskenta.....	33
3.3.1 Yksinkertaistukset.....	33
3.3.2 Laskenta	33
Luku 4 Menetelmät.....	39
4.1 Yleismalli.....	39
4.1.1 Vuosihuolto.....	40
4.1.2 Vuosihuollon ulkopuoliset tuotantotappiot.....	41
4.1.3 Mallinnus	46
4.2 Suurten riskien malli.....	48
4.2.1 Lähdemateriaali.....	48
4.2.2 Aineistoanalyysi.....	51

4.2.3 Mallinnus	56
4.2.4 Suurten riskien palomalli	57
4.3 Suurten riskien mallin ja yleismallin tulosten yhdistäminen	62
Luku 5 Tulokset	63
5.1 Yleismalli	64
5.2 Suurten riskien malli	67
Luku 6 Yhteenveto ja päätelmät	71
6.1 Yleismalli	72
6.2 Suurten riskien malli	73
6.3 Suurimmat tuotantotappiot	76
6.4 Työn tulosten hyödyntäminen	77
6.5 Jatkotutkimukset ja potentiaali	78
Lähdeluettelo	82
Liite 1 Käytettävyyssmallin käytettävyyshlokkokaaviot	86
Liite 2 Käytettävyyssmallin vikaantumiset	88
Liite 3 Analyttisen käytettävyysslaskennan virhe	108
Liite 4 Vuosihuoltojen kestot.....	109

Lyhenteet ja sanasto

ANSI	American National Standard Institute
BWR	Boiling water reactor, kiehutusvesireaktori
<i>DA</i>	Suunnitellun tuotannon käytettävyysskerroin (demand availability)
<i>EAF</i>	Tuotettavissa olevan energian käytettävyysskerroin (energy availability factor)
EPRI	Electric Power Research Institute
FSAR	Final Safety Analysis Report
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IVO	Imatran Voima Oy. Fortum Oyj perustettiin vuonna 1998 IVO:n ja Neste Oyj:n yhdistyessä
<i>J</i>	Alaindeksissä: Järjestelmä
k_{DP}	Käyntivarmuus
k_{LS}	Käynnistyvyys
<i>LF</i>	Käyttökerroin (load factor)
Lo1/Lo2	Loviisan 1/2-ydinvoimalaitosyksikkö
M_j	Järjestelmän korjaustaajuus
MTTF	Mean time to failure, keskimääräinen vikaantumisaika
MTTR	Mean time to repair, keskimääräinen korjausaika
<i>OF</i>	Aikakäytettävyys (operation factor)
<i>PEL</i>	Suunniteltujen tuotantotappioiden määrä tarkastelujaksolla (planned energy losses)
PHWR	Pressurized heavy water reactor, raskaan veden paine-vesireaktori
PRA	Probabilistic Risk Assessment, todennäköisyyspohjainen riskianalyysi
PREB	Parametric robust empirical Bayes
PRIS	Power Reactor Information System, IAEA:n ylläpitämä ydinvoimanlaitosten tuotantotappiotietopankki

PSA	Probabilistic Safety Assessment, todennäköisyyspohjainen turvallisuusanalyysi
PWR	Pressurized water reactor, painevesireaktori
RAM	Reliability, Availability and Maintainability; luotettavuus, käytettävyys ja kunnossapidettävyys
RCM	Reliability Centered Maintenance, luotettavuuskeskeinen kunnossapito
<i>REG</i>	Tuotantomäärä nimellisteholla tarkastelujaksolla (reference energy generation)
<i>S</i>	Alaindeksissä: järjestelmän komponentit kytkettyinä sarjaan
STUK	Säteilyturvakeskus
<i>t</i>	Tuotantoaika tarkastelujaksolla tunneissa
<i>T</i>	Tarkastelujakson pituus tunneissa
<i>t_d</i>	Aika tunneissa, kun tuotanto vastaa suunniteltua tuotantoa tarkastelujaksolla
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
<i>UCF</i>	Kapasiteettikerroin (unit capability factor)
<i>UCL</i>	Suunnittelemattomien tuotantotappioiden epäkäytettävyyskerroin (unplanned capability loss factor)
<i>UEL</i>	Suunnittelemattomien tuotantotappioiden määrä tarkastelujaksolla (unplanned energy losses)
WANO	World Association of Nuclear Operators
WEC	World Energy Council
WNA	World Nuclear Association
<i>XEL</i>	Ulkoisten tuotantotappioiden määrä tarkastelujaksolla (external energy losses)
λ	Vikaantumistaajuus
Λ_J	Järjestelmän vikaantumistaajuus
μ	Korjaustaajuus
M_J	Järjestelmän korjaustaajuus

Luku 1

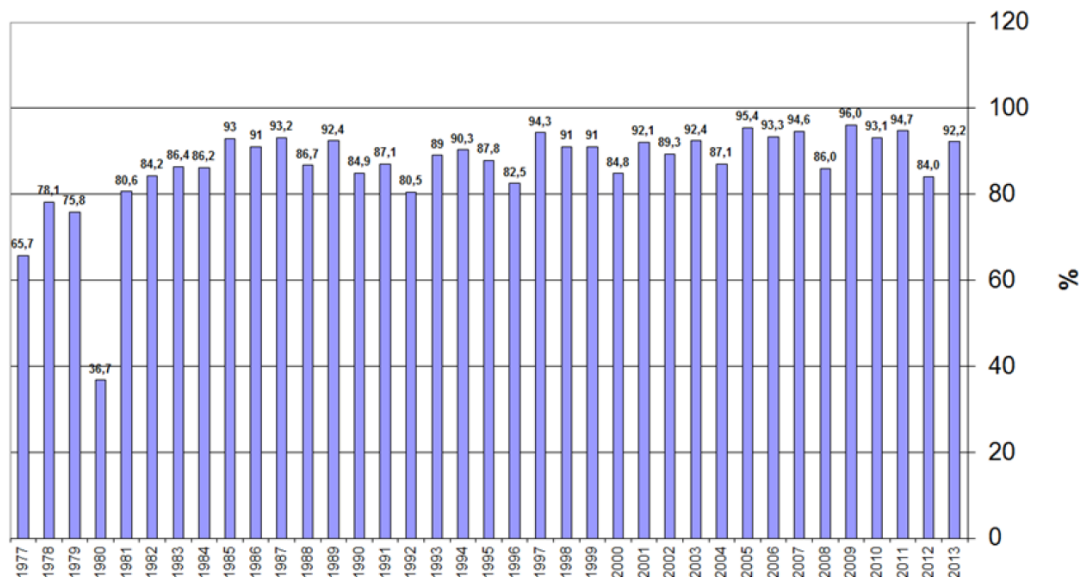
Johdanto

Energia-alalla eletään mullistusten aikaa. Fortumin näkemyksen mukaan (Fortum Oyj, 2014) kasvavat tuet uusiutuvalle energialle yhdessä talouden taantuman, edullisen hiilen ja halpojen päästöoikeuksien kanssa pitävät sähkön tuottajahinnat (tukkuhinnat) alhaisina. Ydinvoimalla on lisäksi omia haasteita. Viimeisin vakava ydinvoimaonnettomuus Fukushimaa Japanissa maaliskuussa 2011 käynnisti uusia ydinturvallisuuden liittyviä tutkimuksia ja aiheutti uusia vaatimuksia ydinvoimayhtiöille (IAEA, 2014a). Fukushimaa onnettomuudella oli myös poliittisia vaikutuksia, esimerkiksi Saksa sulki pysyvästi kahdeksan ydinreaktoria vuonna 2011 Fukushimaa onnettomuuden jälkeen (IAEA, 2015a).

Haasteista huolimatta ydinvoima on tärkeä osa monien maiden energiapolitiikkaa. International Atomic Energy Agency (IAEA) arvioi ydinvoiman hyödyiksi vuonna 2014 (IAEA, 2014b):

- hinnan ennustettavuus toisin kuin fossiilisilla polttoaineilla tuotetussa energiassa
- ydinvoiman luotettavuus
- ilmastonmuutoksen ehkäisy

Monella maalla on suunnitteilla ottaa ydinvoimaa käyttöön tai lisätä ydinvoimaa entisestään. IAEA:n mukaan rakenteilla oli 67 ydinvoimalaitosyksikköä elokuussa 2015. Näistä lähes puolet, yhteensä 33, oli Venäjällä ja Kiinassa (IAEA, 2015a). Suuri määrä käyttöönotettavia ydinvoimalaitoksia kuvaa, että ydinvoima on edelleen kilpailukykyinen.



Kuva 1-1. Loviisan ensimmäisen ydinvoimalaitosyksikön käyttökertoimet 1977-2013 (Eurasto, 2014b).

Käytettävyys on yksi voimalaitoksen suorituskyvyn mittareista. Hyvä käytettävyys, muiden kilpailukykytekijöiden kanssa, tekee ydinvoimalaitoksesta kilpailukykyisen (WEC, 2004). Yksi Fortumilla käytössä olevista käytettävyyden mittareista on käyttökerroin (engl. load factor). Käyttökerroin on tässä työssä käytettävyyden päämittari. Käyttökertoimessa vuoden aikana tuotettua energiaa verrataan nimellisenergiaan. Käyttökerroin, yhdessä muiden käytettävyyden mittareiden kanssa, määrittellään tarkemmin luvussa 3. Käyttökerroin on ydinvoimalaitoksissa hyvä käytettävyyden mittari, koska ydinvoimalaitosten tuotanto pyritään yleensä pitämään mahdollisimman suurena johtuen pienistä muuttuvista kustannuksista. Kustannukset eivät merkittävästi pienene, jos ydinvoimalaitoksen tuotantoa pienennetään. Ydinvoimalaitosten keskimääräinen käyttökerroin vuonna 2013 oli 72,6 % (IAEA, 2015a). Fortumin Loviisan ydinvoimalaitosyksiköiden käyttökertoimet samana aikana olivat Lo1 92,1 %, Lo2 93 % ja yhteensä 92,5 % (Fortum Oyj, 2014). Yhteisellä 92,5 % käyttökertoimella mitattuna Loviisan ydinvoimalaitos kuului vuonna 2013 parhaaseen neljännekseen PWR (painevesireaktori) ydinvoimalaitoksista (IAEA, 2015b). Kuvassa 1-1 näkyy Lo1 käyttökertoimet vuosilta 1977 - 2013. Kuvasta voi esimerkiksi havaita, että käyttökerroin on joka vuosi pysynyt yli 80 % vuoden 1980 jälkeen. Lisäksi joka neljäs vuosi käyttökerroin on ollut selvästi muita vuosia alempi johtuen laajemmasta huoltoisokista.

Ydinvoimalaitosten käyttökerroin ei kerro kaikkea käytettävyydestä, ja siksi käytettävyyden arvioimiseen on monia mittareita. Esimerkiksi Ranskassa 76,93 % sähköstä

tuotettiin ydinvoimalla vuonna 2014, kun Suomessa vastaava luku oli 34,65 % (IAEA, 2015a). Ydinvoiman korkea osuus Ranskassa pakottaa ydinvoimalaitokset seuraamaan kulutusta ja laskemaan tehoa silloin, kun kulutus ei ole suurta. Tehon laskeminen huipputehosta heikentää aina käyttökerrointa. Ranskan ydinvoimalaitosten käytettävyyttä ei siis kannata arvioida pelkästään käyttökertoimen avulla. Suomessa ydinvoimalaitokset käyvät pääasiassa täydellä teholla ja muun tyyppiset voimalaitokset toimivat säätötehona. Esimerkiksi Loviisan ydinvoimalaitos ei ole vuoden 2002 jälkeen pienentänyt tuotantotehoa pienen kulutuksen takia.

Suuret käytettävyyseriskit

Loviisan ydinvoimalaitoksen jo valmiiksi hyvää käyttökerrointa on vaikea parantaa. Tämä on yksi syy miksi tässä työssä huomioidaan myös suuret käytettävyyseriskit. Suuret käytettävyyseriskit aiheuttavat pitkiä seisokkeja. Tässä työssä lähes jokaisen suuren käytettävyyseriskin korjausajaksi arvioidaan yli kuukausi. Jos yksikin tällainen riski toteutuu, niin kyseisen vuoden käyttökerroin alenee merkittävästi. Lisäksi tällaiset suuret riskit alentavat voimalaitoksen koko käyttöiän keskimääräistä käyttökerrointa. Lähes kaikki tässä työssä huomioiduista suurista käytettävyyseriskeistä tapahtuvat odotusarvoisesti harvemmin kuin kerran ydinvoimalaitoksen käyttöiän aikana.

Tässä työssä suurilla riskeillä tarkoitetaan erityisesti Loviisan ydinvoimalaitoksen todennäköisyyspohjaisessa riskianalyysissä (PRA) havaittuja riskejä. Äärimmäisenä esimerkkinä PRA:ssa tunnistetuista suurista riskeistä on reaktoriytimen sulaminen. Sen seurauksena ydinvoimalaitosyksikkö suljetaan pysyvästi, eikä samaa reaktoria enää käynnistetä. Suurin osa PRA:ssa havaituista riskeistä ei aiheuta pysyvää voimalaitoksen sulkemista (Jänkälä, et al., 2014b).

Kuvasta 1-1 näkee, että vuosina 1981-2013 käyttökerroin on pysynyt Lo1:llä yli 80 % ja vaihtelu on pysynyt vuodesta toiseen samansuuruisena. Korkeana pysynyt käytettävyyys tarkoittaa, että Lo1:llä ei ole toteutunut tällä aikavälillä yhtään suurta käytettävyyseriskiä. Vuonna 1980 Loviisan ydinvoimalaitoksella realisoitui yksi suuri käytettävyyseriski, korjausaika oli useita kuukausia. Kuvassa 1-1 näkyy, kuinka käyttökerroin oli vuonna 1980 alle 40 %.

1.1 Tavoitteet ja sisältö

Työn tarkoituksena ja siitä saatavana hyötynä on erityisesti tieto suurista käytettävyyseriskeistä ja niiden suuruudesta. Työ tehdään Fortumin Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA ryhmässä, jolla on osaamista erityisesti ydinturvallisuuteen liittyvistä riskeistä. Suuri osa ydinturvallisuusriskeistä aiheuttaa edes osittain toteutuessaan pitkiä seisokkeja. Työssä ei kuitenkaan arvioida pelkästään suuria riskejä, koska tulosten arvi-

oiminen ja vertaaminen muihin tutkimuksiin on helpompaa, kun käytettävyyden arvioinnissa on mukana myös yleisimmät käytettävyyseriskit.

Diplomityö toimii myös pilottiprojektina Loviisan ydinvoimalaitoksen käytettävyyssanalyysille. Työssä arvioidaan minkälaista hyötyä on saatavissa käytettävyyssanalyysistä joko ilman tai yhdessä suurten riskien käytettävyyssanalyysin kanssa.

Työssä yhdistetään Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:ta ja tietoa käytöstä ja kunnossapidosta, joten Loviisan ydinvoimalaitoksen esittelyssä luvussa 2 tarkastellaan erityisesti tietoja näistä molemmista. Luvussa 3 listataan käytettävyyden mittareita eri lähteistä, käydään läpi tarvittavat menetelmät käytettävyyden analyttiseen laskentaan ja tehdään lyhyt kirjallisuuskatsaus käytettävyyssanalyysistä. Luvussa 4 arvioidaan käytetyt lähdemateriaalit ja tarvittavat menetelmät aineistoanalyysiin ja mallinnukseen. Luvussa 5 esitetään tulokset ja luvussa 6 yhteenveto ja päätelmät. Yhteenvetoon ja päätelmiin sisältyy arviot työn tulosten käyttämisestä ja kuinka työtä kannattaa jatkokehittää.

1.2 Rajaukset

Suurten käytettävyyseriskien analyysi rajataan Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n yhteydessä tunnistettuihin riskeihin ja alkutapahtumiin. PRA:n pohjalta tunnistetaan alkutapahtumat, jotka mallinnetaan käytettävyyssmalliin. PRA:n eri onnettomuusketjuja ei huomioida, vaan jokainen alkutapahtuma huomioidaan vain yhtenä käytettävyyseriskinä joitain yksittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta.

Yleisten tuotantotappioiden käytettävyyssanalyysi rajataan Loviisan ydinvoimalaitoksen omaan käyttöhistoriaan. Järjestelmiä ei mallinneta suoraan komponenttien vikaantumistietojen perusteella. Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöhistoriasta huomioidaan ainoastaan tuotantotappioita aiheuttaneet vikaantumiset. Yleisten tuotantotappioiden analyysissä ei esimerkiksi käytetä tietoja muilta ydinvoimalaitoksilta tai mallinneta vikaantumismahdollisuuksia oman historian pohjalta.

Myöhemmissä jatkoanalyysissä on suositeltavaa mallintaa Loviisan ydinvoimalaitoksen järjestelmät tarkemmin. Tarkemmissa mallinuksissa voidaan huomioida myös sellaiset vikaantumiset, jotka eivät suoraan aiheuta tuotantotappioita. Vastaavasti suurten käytettävyyseriskien laajentaminen myös muihin pitkiä seisokkeja aiheuttaviin tuotantotappioihin on suositeltavaa. Työssä ei arvioida, kuinka suuri osa käytettävyyseriskeistä jää huomioimatta tai mikä on näiden huomioimatta jääneiden käytettävyyseriskien vaikutus.

Luku 2

Loviisan ydinvoimalaitos

Tässä luvussa esitellään ensin yleisellä tasolla Loviisan ydinvoimalaitosta. Sen jälkeen tutustutaan tarkemmin tässä työssä yhdistettyihin osa-alueisiin Loviisan ydinvoimalaitoksesta. Näihin kuuluvat käyttö, kunnossapito ja todennäköisyyspohjainen riskianalyysi.

2.1 Yleiskuvauk

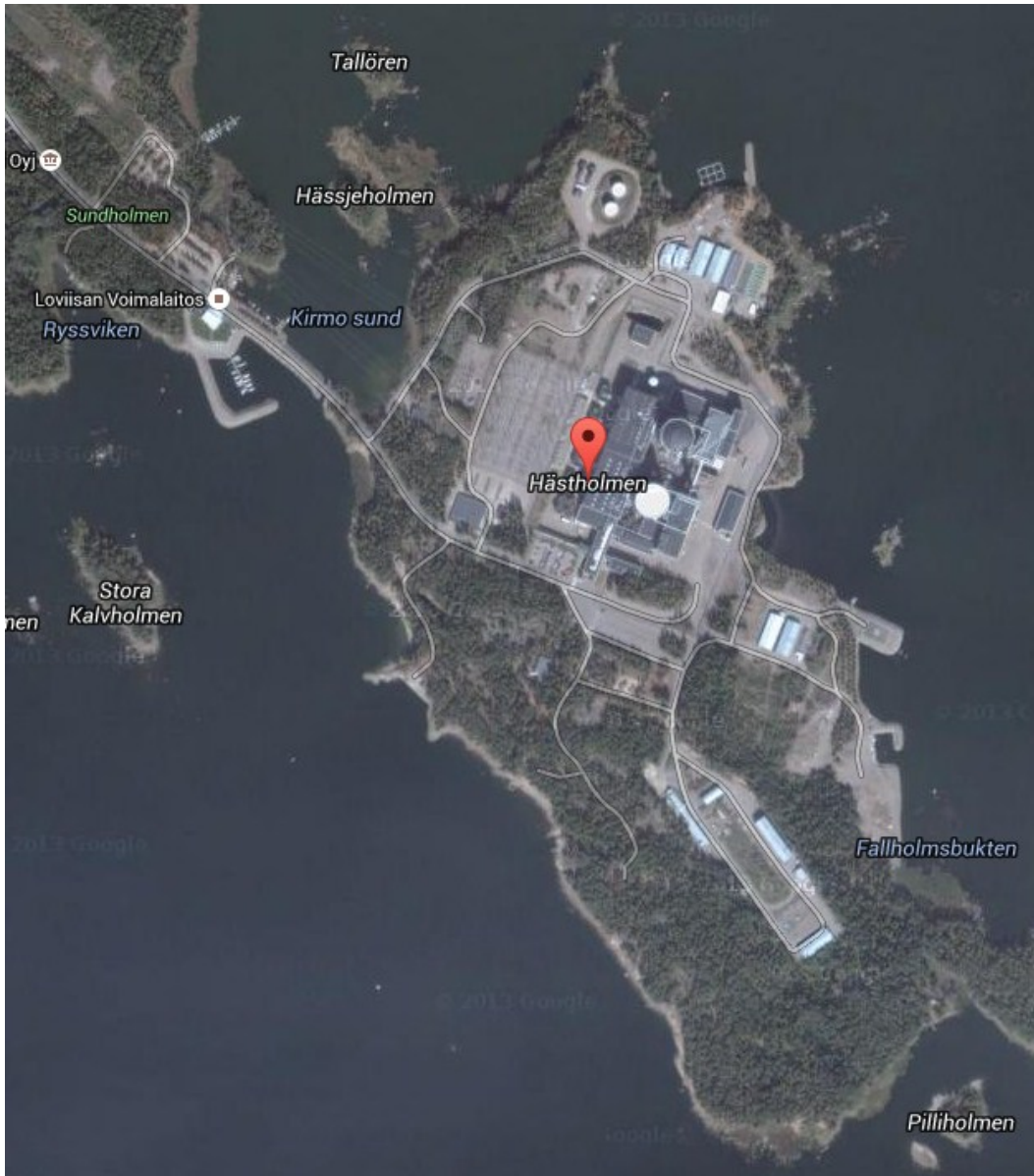
Loviisan ydinvoimalaitos on ensimmäinen Suomeen rakennettu ydinvoimalaitos. Se sijaitsee Suomenlahden rannalla Hästholmenin saarella Loviisassa. Kuvaan 2-1 on merkitty Loviisa Suomen kartalle ja kuvassa 2-2 näkyy satelliittikuvassa Hästholmenin saari ja Loviisan ydinvoimalaitoksen alue (Google, 2015). Loviisan ydinvoimalaitoksessa on kaksi Venäläistä VVER-440 -tyyppistä painevesireaktoria. Ensimmäinen yksikkö (Lo1) valmistui helmikuussa 1977 ja toinen (Lo2) marraskuussa 1980. Alun perin molemmille yksiköille annettiin 30 vuoden käyttöikä. Käyttöikää on pidennetty jatkuvalla korjaamisella ja voimalaitoksen parantamisella. Vuonna 2015 uusin päätös käyttöiästä on valtioneuvoston päätös vuodelta 2006 (Sipola & Nuutinen, 2014). Sen mukaan käyttöluvut loppuvat vuosina 2027 (Lo1) ja 2030 (Lo2).

Imatran Voima tilasi Loviisan ydinvoimalaitosyksiköt Neuvostoliittolaiselta Technopromexportilta vuosina 1970 ja 1971. Jo ensimmäisiä ydinvoimalaitoksia hankittaessa Suomen valtiovalta ei hyväksynyt ydinvoimalaitoksen tilaamista pelkästään liiketaloudellisin perustein. Ydinvoimalaitoksia ei tilattu normaalilla tarjouskilpailulla vaan politiikka piti ottaa huomioon. Koko voimalaitosta ei tilattu silloisesta Neuvostoliitosta. Pääkomponentit kuten reaktori, turpiini ja generaattori ovat Neuvostoliitosta, mutta turvajärjestelmät ja automaatio ovat länsimaista tekniikkaa. (Salomaa, et al., 2004)



Kuva 2-1. Loviisan ydinvoimalaitos Suomen kartalla (Google, 2015).

Loviisan ydinvoimalaitosyksiköt ovat identtiset joitain yksittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta. Molempien reaktorien alkuperäinen nettoteho oli 420 MW (Salomaa, et al., 2004). Tehoa on vuosien mittaan korotettu ja 1.1.2012 lähtien arvioitu nettoteho on 496 MW ja bruttoteho on 520 MW (Lahti, 2011). Vuonna 2014 Loviisan ydinvoimalaitoksen nettosähköntuotanto oli 7883 GWh, joka vastasi 12,06 % Suomessa tuotetusta sähköstä.



Kuva 2-2. Loviisan ydinvoimalaitos, voimalaitosalue ja Hästholmen saari satelliittikuvassa (Google, 2015).

Seuraavaksi tarkastellaan Loviisan ydinvoimalaitoksen historiasta muutamaa erilaista käytettävyyden arvoa. Diplomityön tuloksia verrataan luvussa 6 näihin lukuarvoihin. Taulukossa 2-1 on Loviisan ensimmäisen ydinvoimalaitosyksikön (Lo1) käyttöker-
toimet vuodelta 2014 ja keskiarvot vuosilta 2010 - 2014, 1981 - 2014 ja 1977 - 2014 (IAEA, 2015a). Aikaväli 1977 - 2014 sisältää koko Lo1:n käyttöhistorian vuoden 2014 loppuun mennessä. Käyttöhistoriaa vuodesta 1981 eteenpäin käytetään myö-
hemmissä analyyseissä. Taulukossa 2-2 näkyy Lo1:n keskimääräinen tehoajonaikai-
nen käytettävyys vuosina 1981 - 2014 ja 1977 - 2014. Tehoajonaikaisista käytettä-

vyyksistä on poistettu keskimääräinen vuosihuolto. Yhden kokonaisen vuosihuoltopäivän arvioidaan vähentävän käytettävyyttä $1 / 365 = 0,274$ %-yksikköä. Taulukossa L4-1 on Lo1:n vuosihuoltojen pituudet vuosilta 1981 - 2014 ja niiden keskiarvo. Vuosi-
huoltojen kestot kerättiin käyttöhistoriakäyrltä.

**Taulukko 2-1. Loviisan ensimmäisen ydinvoimalaitosyksikön (Lo1) käyttöker-
toimet eri ajanjaksoilla (IAEA, 2015a).**

Aikaväli	1977 - 2014	1981 - 2014	2010 - 2014	2014
Käyttökerroin (%)	87,2	89,4	91	92,3

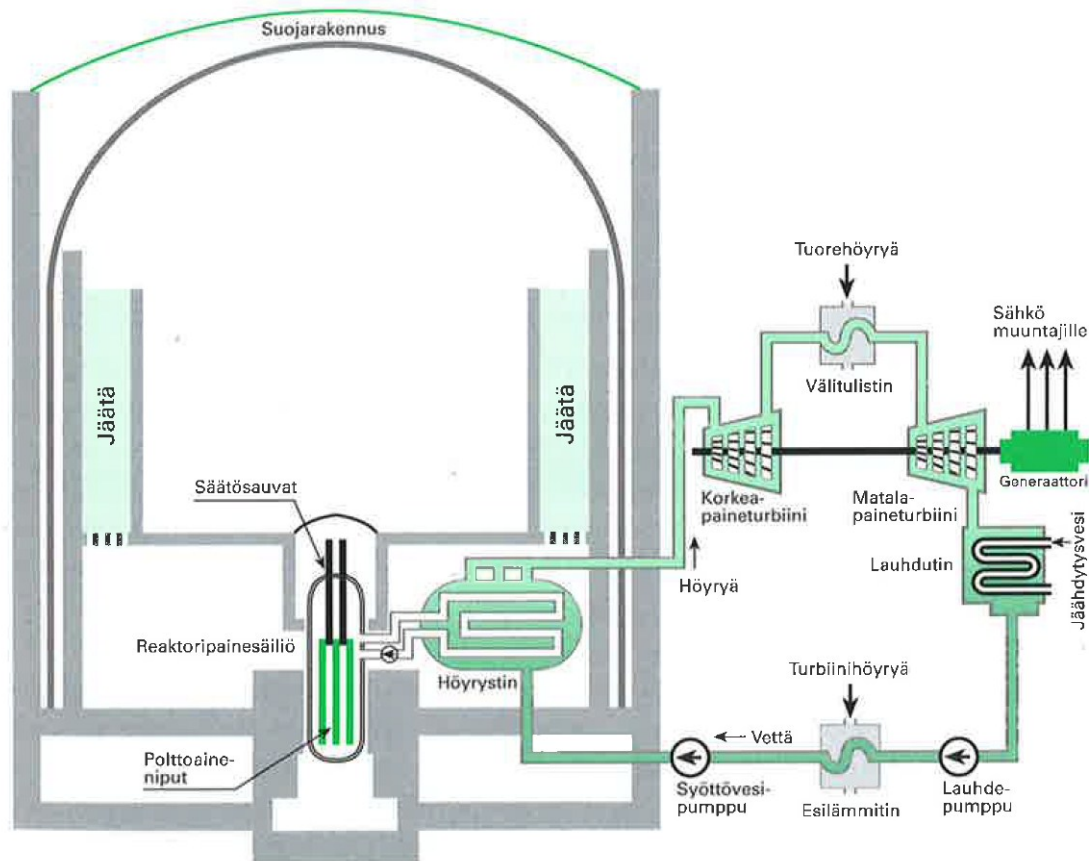
**Taulukko 2-2. Lo1 keskimääräinen tehoajonaikainen käytettävyys vuosina 1981 -
2014 ja vuoden 2014 loppuun mennessä (IAEA, 2015a).**

Aikaväli	1977 - 2014	1981 - 2014
Käytettävyys (%)	96,0	98,2

Toimintaperiaate ja käytettävyys

Loviisan ydinvoimalaitos ei tuota kaukolämpöä vaan ainoastaan sähköä. Loviisan ydinvoimalaitoksen ylijäämälämpö jäähdytetään merivedellä samoin kuin Olkiluodon ydinvoimalaitoksessa. Merivesijäähdytyksen lisäksi Loviisan ydinvoimalaitokselle on rakennettu kolme jäähdytystornia turvaamaan jälkilämmön poisto, jos merivesijäähdytys menetetään. Jäähdytystornit on tarkoitus saada käyttöön vuoden 2015 vuosi-
huolloissa.

Muiden painevesireaktorien tavoin Loviisan ydinvoimalaitoksella on kaksi erillistä jäähdytyspiiriä, primääripiiri ja sekundääripiiri. Merivesijäähdytyksen takia Loviisan ydinvoimalaitoksessa on lisäksi merivesipiiri. Näiden eri piirien välillä on lämmön-
vaihtimet. Kuvassa 2-3 näkyy Loviisan ydinvoimalaitoksen periaatekaavio. Toiminta-
periaate on sama molemmilla Loviisan ydinvoimalaitosyksiköillä.



Kuva 2-3. Loviisan ydinvoimalaitoksen periaatekaavio (Salomaa, et al., 2004).

Reaktorissa ydinpolttoaine fissioituu lämmittäen primääripiirin veden. Primääripiiri koostuu kuudesta erillisestä kiertopiiristä, joissa jokaisessa on oma pääkiertopumppu ja höyrystin. Primääripiirin vesi lämmittää sekundääripiirin veden. Molemmilla yksiköillä on kaksi turpiinia ja sekundääripiirit jokaiselle turpiinille ovat toisistaan erillisiä. Sekundääripiirin vesi lämmitetään ja höyrystetään höyrystimessä ja se kulkee turpiinien kautta. Turpiinit pyörittävät generaattoreita, jotka muuttavat pyörimisliikkeen sähköenergiaksi. Tuotettu sähköenergia syötetään kahden pääkiskon kautta valtakunnan kantaverkkoon. Turpiinien jälkeen höry lauhdutetaan lauhduttimissa ja pumpataan syöttövesipumpuilla takaisin höyrystimeen. Turpiinien jälkeinen ylijäämlämpö siirretään merivesipiireillä mereen (Pirinen, 2010).

Loviisan ydinvoimalaitoksen suunnitteluratkaisuilla sekä huolloilla on merkitystä käytettävyyden kannalta. Suunnitteluratkaisuissa käytettävyyteen vaikuttaa esimerkiksi primääripiirin kiertopiirien määrä. Primääripiirin kuusi kiertopiiriä mahdollistavat tuotannon vaikka 1 - 3 kiertopiiriä menetetään. Yhden pääkiertopumpun vikaantumi-

nen alentaa tuotantotehoa vain noin kuudesosalla. Mitä enemmän on pääkiertopiirejä ja -pumppuja, niin sitä vähemmän yhden pumpun vikaantuminen pienentää tehoa.

Huoltojen avulla voidaan vaikuttaa pääkiertopumppujen toimivuuteen ja vikaantumistiheyteen. Mitä perusteellisemmin huolletaan, sitä varmemmin pumppu toimii ja käytettävyys paranee, mutta sitä enemmän tulee myös huoltokustannuksia. Myös pääkiertopumppujen lukumäärä vaikuttaa investointi- sekä huoltokustannuksiin.

Muiden ydinvoimalaitosten tavoin Loviisan ydinvoimalaitoksella on varauduttu erilaisiin onnettomuuksiin. Esimerkiksi primääri- tai sekundääripiirin vuodoissa vettä voidaan syöttää primääripiiriin paineistetuista vesisäiliöistä ja hätäjähdytyspuilla ja sekundääripiiriin hätäsyöttövesi- ja varahätäsyöttövesipumpuilla (Pirinen, 2010).

2.2 Käyttö ja kunnossapito

Tässä luvussa käydään läpi Loviisan ydinvoimalaitoksen käytön ja kunnossapidon periaatteita, jotka vaikuttavat käytettävyYTEEN. Lisäksi Loviisan ydinvoimalaitoksella tehdään monenlaisia analyysejä, jotka suoraan liittyvät käytettävyYTEEN. Myös näitä analyysejä käydään läpi tarvittavilta osin. Ensin esitetään kuinka Loviisan ydinvoimalaitoksella ennustetaan tuotannon määrää ja sen jälkeen esitetään tarkempia tietoja Loviisan ydinvoimalaitoksen kunnossapidosta, sen strategioista ja optimoinnista.

Tuotantoennuste

Loviisan ydinvoimalaitosyksiköille laaditaan tuotantoennusteet brutto- ja nettotuotannoille päivä-, viikko-, kuukausi- ja vuositasolla. Tuotantoennusteen laadintaohjeen (Lahti, 2014) mukaan merkittävimpiä muuttujia tuotantoennusteessa ovat:

- laitosyksiköiden vuosihuoltojen kesto ja ajoittuminen
- reaktoreiden lataukset
- sähkötehon riippuvuus meriveden lämpötilasta
- oletus tuotannonmenetyksistä vuositasolla

Lisäksi vähemmän merkityksellisiä muuttujia ovat laituskunto ja vuosittain tehtävät koestukset. Tuotantoennusteeseen liittyy kolme erilaista ennustetta: optimituotanto, paras mahdollinen tuotanto ja tuotantotavoite. Eri tuotantoennusteissa huomioidaan eri määrä muuttujia. Optimituotannossa huomioidaan vähiten tuotantoon liittyviä muuttuvia tekijöitä ja tuotantotavoitteessa eniten. Tuotantotavoite pyrkii parhaiten kuvaamaan tuotannon määrää. Seuraavaksi listataan tuotantotavoitteessa huomioitujen muuttujien tiedot, kuinka nämä huomioidaan ja miten arvio muuttujille saadaan.

Vuosihuollot

Vuosihuoltojen kestojen arviot määritetään erikseen vuosihuoltosuunnittelussa. Vuosihuollon tyyppi ja vuosihuollossa tehtävät työt vaikuttavat merkittävästi vuosihuollon pituuteen. Loviisan ydinvoimalaitoksen seisokkien suunnittelu- ja toteutusohjeessa (Vonka, 2007) arvioidaan vuosihuollon pituudeksi 15 - 38 vuorokautta riippuen vuosihuoltotyypistä. Vuosihuollon aloituksessa ja lopetuksessa huomioidaan seuraavia asioita:

- Vuosihuollon aloitus- ja lopetuspäivän ennustetaan olevan 50 % lämpöteholla.
- Vuosihuollon jälkeisen ylösajon ennustetaan kestävän kolme vuorokautta ja noudattavan yleistä polttoainelatauksen jälkeistä tehonnostoprofilia.

Reaktorin lataus

Vuosittainen lataussuunnitelma perustuu selvityksiin polttoainelatauksen reaktorifysiikkalisista ominaisuuksista ja polttoaineen käyttäytymisestä (Kuopanportti & Kakkonen, 2014). Kyseisissä selvityksissä arvioidaan täysillä parametreilla ajettavien päivien lukumäärä täystehopäivinä sekä lopputeho ennen vuosihuoltoa. Lataussuunnitelma tehdään vain seuraavalle vuodelle ja tätä pidemmissä tuotantoennusteissa käytetään yleistä lataussuunnitelma-arvioita.

Meriveden lämpötila

Tuotantoteholle meriveden lämpötilan funktiona on määritetty kolmannen asteen polynomit. Polynomit on erikseen merivesipumppujen matalille ja suurille kierroksille. Meriveden lämpötilalle on arvioitu päiväkeskiarvot vuosien 2004 - 2008 perusteella. Meriveden lämpötilan päiväkeskiarvojen perusteella ja tuotantotehofunktiolla määritetään ennusteet jokaiselle päivälle vuoden aikana ilman muita tuotantotappiota. Jäähdytysveden lämpötilan eroavaisuus ennustetusta on pieni talvella mutta voi aiheuttaa suuruusluokaltaan gigawattituntien virheitä kuukausitasolla kevään, kesän ja syksyn aikana, kun jäähdytysveden lämpötila saattaa vaihdella merkittävästi keskiarvosta. Epävarmuus ei ole kuitenkaan suuri vuositasolla, koska tarkasti ennustettavissa olevan kylmän meriveden kausi vaikuttaa merkittävästi. (Lahti, 2014)

Laitoskunto

Laitoskunnossa huomioidaan ennustushetkellä tiedossa olevat, tyypillisesti hyötysuhteen kautta sähkötehoon vaikuttavat seikat. Tuotantoennusteessa huomioidaan koestuksista ainakin höyrystimen (RA) varoventtiilien koestus, joka tehdään venytysajolla. RA-varoventtiilien koestuksen arvioidaan laskevan keskimääräisen lämpötehon koestusvuorokauden ajaksi noin 92,5 % tehoon nimellistehosta.

Viat ja tuntemattomat tuotannonmenetykset

Kun kaikki muut tuotantoon vaikuttavat tekijät on huomioitu, niin huomioidaan vielä että tehoajolla tapahtuu vikoja ja tuntemattomia tuotannonmenetyksiä. Nämä huomioidaan tehoajonaikaisessa käytettävyydessä. Tehoajonaikainen käytettävyys on jonkin verran pienempi, kuin toteutunut keskimääräinen käytettävyys tehoajolla. Keskimääräistä toteutunutta alemmalla käytettävyydellä huomioidaan muun muassa yksiköiden vanhenemisen riskit. (Lahti, 2014)

Nimellisteho

Nimellistehon määrittäminen liittyy läheisesti tuotantoennusteeseen. Samoja tuotantomääriin vaikuttavia tekijöitä pitää huomioida nimellistehon ja tuotantoennusteen määrittämisessä. Nimellisteho liittyy myös läheisesti erilaisiin tuotannon mittareihin. Esimerkiksi monissa käytettävyyden mittareissa nimellisteholla saatavaa tuotantoa verrataan vuoden aikana eri tavalla tuotettuihin energiamääriin. Loviisan ydinvoimalaitoksella nimellistehoa käytetään myös tuotantotappioiden suuruuksien määrittämisessä. Loviisan ydinvoimalaitoksen nimellistehot 1.1.2012 alkaen (Lahti, 2011):

Loviisa 1:

- Reaktorin nimellislämpöteho 1500 MW
- Bruttosähköteho 520 MW
- Nettosähköteho 496 MW

Loviisa 2:

- Reaktorin nimellislämpöteho 1500 MW
- Bruttosähköteho 520 MW
- Nettosähköteho 496 MW

Loviisan ydinvoimalaitoksen nimellistehot vastaavat keskimääräisten ympäristöolosuhteiden aikana vallitsevaa sähkötehoa. Bruttonimellistehossa generaattorien tuottamasta sähkötehosta vähennetään vielä päämuuntajien häviöt. Nimellistehojen määrittäminen noudattaa IAEA:n ja WANO:n ohjeistusta. Ainoa merkittävästi vaikuttava ja samalla nimellistehossa huomioitu ympäristöolosuhde on meriveden lämpötila. Myös ulkoilman lämpötila vaikuttaa jonkin verran omakäyttötehoon, mutta sen vaikutus peittyy meriveden lämpötilan vaikutukseen.

Nykyiset nimellistehot on määritetty vuosien 2002 - 2010 meriveden lämpötilojen ja tuotantotehojen perusteella. Näiden perusteella keskimääräisiä ympäristön olosuhteita edustavan meriveden lämpötila on 7,8 °C. Tällä meriveden lämpötilalla vallitsee

Lo1:llä 519,2 MW ja Lo2:lla 520,6 MW bruttotehotasot. Nimellistehoa arvioitaessa näistä vähennetään vielä päämuuntajahäviöt ja bruttonimellistehoksi arvioitiin 520,0 MW molemmille Loviisan ydinvoimalaitosyksiköille. Omakäyttötehoksi on arvioitu 24 MW joten nettonimellistehoksi on saatu 496 MW.

Kunnossapito

Kunnossapito ja sen käytännöt vaikuttavat käytettävyyteen, joten tässä käydään lyhyesti läpi tämän työn kannalta tärkeitä osia Loviisan ydinvoimalaitoksen kunnossapidosta. Kunnossapito käsittää tässä yhteydessä laitteiden vikaantumisten hallintaa, niihin varautumista ja ennaltaehkäisyä. Loviisan ydinvoimalaitoksen kunnossapidon tietoja kerätään seuraavista raporteista ja ohjeista:

- Laadunvarmistuskäsikirja (Salonen & Holmström, 2013)
- Kunnossapidon strategiat (Laakso & Leino, 2014a) ja komponenttien kriittisyysluokittelu (Laakso & Leino, 2014b)
- Esimerkkejä käytettävyysskeskeisen kunnossapidon analyyseista:
 - Pääkiertopumput (Hostikka, 2013)
 - Päämerivesipumput (Hostikka & Lehtinen, 2013)

Hyvin johdettu ja korkealla ammattitaidolla suoritettu kunnossapito on edellytys ydinvoimalaitoksen turvallisen ja taloudellisen käytön turvaamiseksi. Tavoitteeseen päästään parantamalla jatkuvasti turvallisuutta, käytettävyyttä, suorituskykyä ja kustannustehokkuutta. Kunnossapidon päätavoitteet Loviisan ydinvoimalaitoksella (Salonen & Holmström, 2013):

- Parantaa turvallisuutta (laitos/henkilö).
- Optimoida laitteistojen, laitteiden ja komponenttien käytettävyyttä.
- Tehostaa kunnossapidon suorituskykyä:
 - Vähentää uudelleen korjauksia
 - Parantaa laitteiston kunnossapidettävyyttä
 - Kasvattaa organisaation suorituskykyä.
- Optimoida kunnossapitokustannuksia.
- Laitoksen taloudellisen käyttöiän pidentäminen.
- Laitteistojen, rakenteiden ja järjestelmien käyttökuntoisuus varmistetaan laadukkaalla huoltotoiminnalla siten, että käyttökuntoisuus säilyy huoltovälin yli.

Kunnossapidon strategiat

Loviisan ydinvoimalaitoksen kunnossapito jakautuu viiteen strategiaan (Laakso & Leino, 2014a):

- Ennakoiva kunnossapito
- Ehkäisevä kunnossapito
- Yhdistetty kunnossapito (Ennakoiva ja Ehkäisevä)
- Korjaava kunnossapito
- Parantava kunnossapito

Vikakorjaukset ja kunnostukset kohdistuvat laitteisiin, jotka ovat ennakoivan, ehkäisevän tai niistä muodostetun yhdistelmän tai korjaavan kunnossapidon piirissä riippuen laitteelle valitusta strategiasta. Tarkoitus on, että ennakoivan ja ehkäisevän kunnossapidon piirissä olevat laitteet huolletaan ennen vikaantumisia. Laitteen kunnossapito-ohjelmassa on mahdollisesti parannettavaa, mikäli vikakorjaustarve syntyy laitteelle, joka on ennakoivan tai ehkäisevän kunnossapidon piirissä. Esimerkiksi laitteen valvonta voi olla puutteellista tai ehkäisevä huolto väärin ajoitettu tai kohdistettu.

Ennakoiva kunnossapito perustuu kuntoa ja/tai suorituskykyä kuvaavien tunnuslukujen analysointiin ja arviointiin sekä niitä seuraaviin toimenpiteisiin. Laitteiden kunnossapito perustuu niiden kuntoon - ei aikaan.

Ehkäisevä kunnossapito perustuu aikaan. Kunnossapito suoritetaan määrävälein ja sen tarkoituksena on pienentää kohteen vaurioitumistodennäköisyyttä tai toimintakunnon heikkenemistä.

Yhdistelmä eli ennakoiva- ja ehkäisevä kunnossapito sisältää molempien kunnossapitostrategioiden menetelmät. Yhdistelmästrategian piiriin kuuluvat ensisijaisesti laitoksen kriittisimmät laitteet.

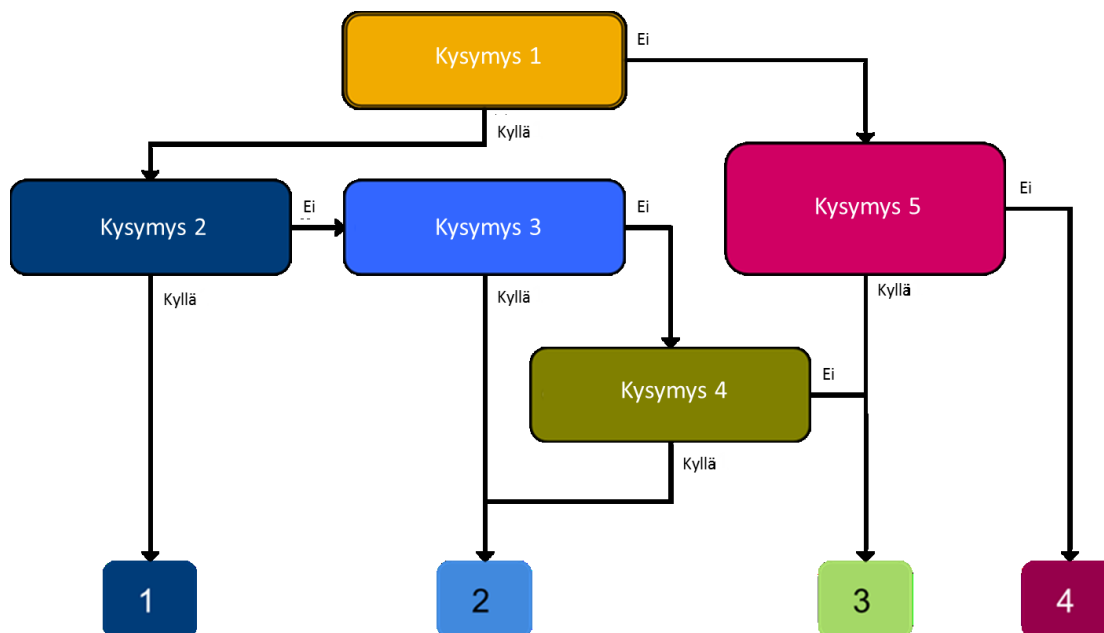
Korjaavassa kunnossapidossa laite ei ole ennakoivan eikä ehkäisevän kunnossapidon piirissä, vaan laitteelle suoritetaan korkeintaan aistinvaraista havainnointia. Laite korjataan tai vaihdetaan, kun sen toimintakyky on alentunut (kunnostus) tai se ei suoriudu sille tarkoitettusta tehtävästä (vikakorjaus).

Parantava kunnossapito sisältää kunnossapidon korjaavat ja parantavat toimenpiteet. Näihin kerätään informaatiota ja sitä myös syntyy kunnossapidon yhteydessä. Toimenpiteet voivat kohdistua laitteisiin, järjestelmiin, rakenteisiin tai toimintatapoihin.

Kunnossapidon strategian valinta ja laitteiden kriittisyysluokittelu

Kunnossapitostrategian valinta kullekin laitteelle perustuu turvallisuus ja tuotantonäkökohtiin, viranomaisvaatimuksiin, ympäristöolosuhteisiin, käyttö- ja kunnossapitokokemuksiin sekä näistä johdettuun laiteluokitteluun (kriittisyysluokittelu). Ku-
vassa 2-4 näkyy kriittisyysluokittelun vuokaavio. Vuokaavion kysymykset perustuvat

yllä mainittuihin kunnossapidon strategian valintaperusteisiin. Kuvasta 2-4 on luottamuksellisin poistettu tarkat kriteerit, joiden mukaan kriittisyysluokka määräytyy.



Kuva 2-4. Loviisan ydinvoimalaitoksen kriittisyysluokittelun vuokaavio. Kuvasta on luottamuksellisin poistettu kysymykset, joiden perusteella kriittisyysluokka valitaan (Laakso & Leino, 2014b).

Kaikki laitteet on luokiteltu neljään luokkaan. Luokkaan 1 kuuluvat kaikkein kriittisimmät laitteet, joiden vikaantuminen johtaa huomattaviin tuotannollisiin menetyksiin. Luokkaan 4 kuuluvat laitteet, joilla ei ole turvallisuusvaatimuksia eikä tuotannollisesti tai taloudellisesti ole perusteltua suorittaa kunnossapitoa. Laiteluokan 4 laitteet kuuluvat korjaavan kunnossapitostrategien piiriin. Luokkaan 2 kuuluvien laitteiden vikaantuminen saattaa aiheuttaa kohtalaisia tuotannonmenetyksiä tai ovat turvallisuuden kannalta tärkeitä. Luokkaan 3 kuuluvat laitteet saattavat aiheuttaa vähäisiä tuotantotappiota vikaantuessaan, ovat turvallisuuden kannalta kohtalaisen tärkeitä, tai niiden kunnossapidon suunnittelu on muuten perusteltua tai kustannustehokasta.

Luokan 1 laitteilla kunnossapitoon kiinnitetään eniten huomiota ja vastaavasti luokan 4 laitteiden kunnossapitoon kiinnitetään vähiten huomiota. Luokan 4 laitteiden kuntoa ei erikseen seurata ja ne voidaan ajaa suunnitelmallisesti toiminnalliseen vikaantumiseen asti. Luokkien 2 ja 3 laitteiden huolto-ohjelma on luokkien 1 ja 4 välistä. Kriittisyysluokittelu ei kuitenkaan suoraan määrää kunnossapitostrategiaa vaan siinä huomioidaan myös muita asioita (Laakso & Leino, 2014).

Kunnossapidon optimointi

Laitteiden kunnossapitoa myös optimoidaan. Kunnossapidon optimointi perustuu parantavan kunnossapidon tunnuslukujen analysoinnista saatuu informaatioon. Analysoitaessa tunnuslukuja, tunnistetaan potentiaalisia parannuskohteita. Parannuskohteita voivat olla muun muassa kustannussäästöt, laitteiden käytettävyyssongelmat, inhimilliset virheet tai uudelleen korjaukset ja ylilaatu.

Optimoinnissa sovelletaan erilaisia optimointimenetelmiä, joita voivat olla muun muassa:

- Laitetyyppikohtaiset kunnossapito-ohjelmat (vuokaaviot)
- RCM-analyysit
- Erilaisten laskentaohjelmien käyttö (esim. laakereiden voiteluvälin laskenta)
- Vika- ja juurisyyanalyysit

RCM (engl. reliability centered maintenance) tarkoittaa luotettavuuskeskeistä kunnossapitoa. Optimointimenetelmät valitaan tapauskohtaisesti laitteen tyyppin ja kriittisyyden perusteella. Seuraavaksi esitellään vielä kaksi esimerkkiä kuinka kunnossapitoa optimoidaan Loviisan ydinvoimalaitoksella. Vuonna 2013 valmistui kaksi RCM-analyysiä, joista toinen pääkiertopumpuille (Hostikka, 2013) ja toinen päämerivesipumpuille (Hostikka & Lehtinen, 2013).

Molemmissa analyysissä työkaluna oli Ramentor Oy:n ELMAS (Event Logic Modeling and Analysis Software) -ohjelmisto (Ramentor, 2015). Analyysissä tarkasteltiin pumppujen riskejä ja ennakkohuolto-ohjelmaa RCM-analyysin avulla. Käytettävyyssriskit ja kustannukset pyrittiin minimoimaan. Analyysit perustuivat pumppujen toimintaperiaatteisiin, käyttöohjeisiin, kyseisten pumppujen vikahistoriaan ja asiantuntija-arvioihin. Analyysien tuloksena tunnistettiin kriittisiä osia pumppujen toiminnalle, uusia aiemmin tunnistamattomia riskejä ja arvioitiin mahdollisuuksia ja toimenpiteitä kustannusten pienentämiseen pienentämättä merkittävästi pumppujen luotettavuutta. Töiden tuloksien perusteella esimerkiksi pidennettiin päämerivesipumppujen huoltoväli neljästä vuodesta kuuteen vuoteen.

2.3 Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi

Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi (PRA) on systemaattinen tapa arvioida monimutkaisten järjestelmien riskejä. PRA:ssa mallinnetaan järjestelmien toimintaa, riskejä ja tapahtumia. Tuloksena saadaan todennäköisyyksiä tai ilmenemistäajuuksia vakavammille tapahtumille tai onnettomuuksille sekä pystytään tunnistamaan suurimmat riskiä kasvattavat tekijät. Näin PRA:n avulla pystytään tehokkaasti pienentä-

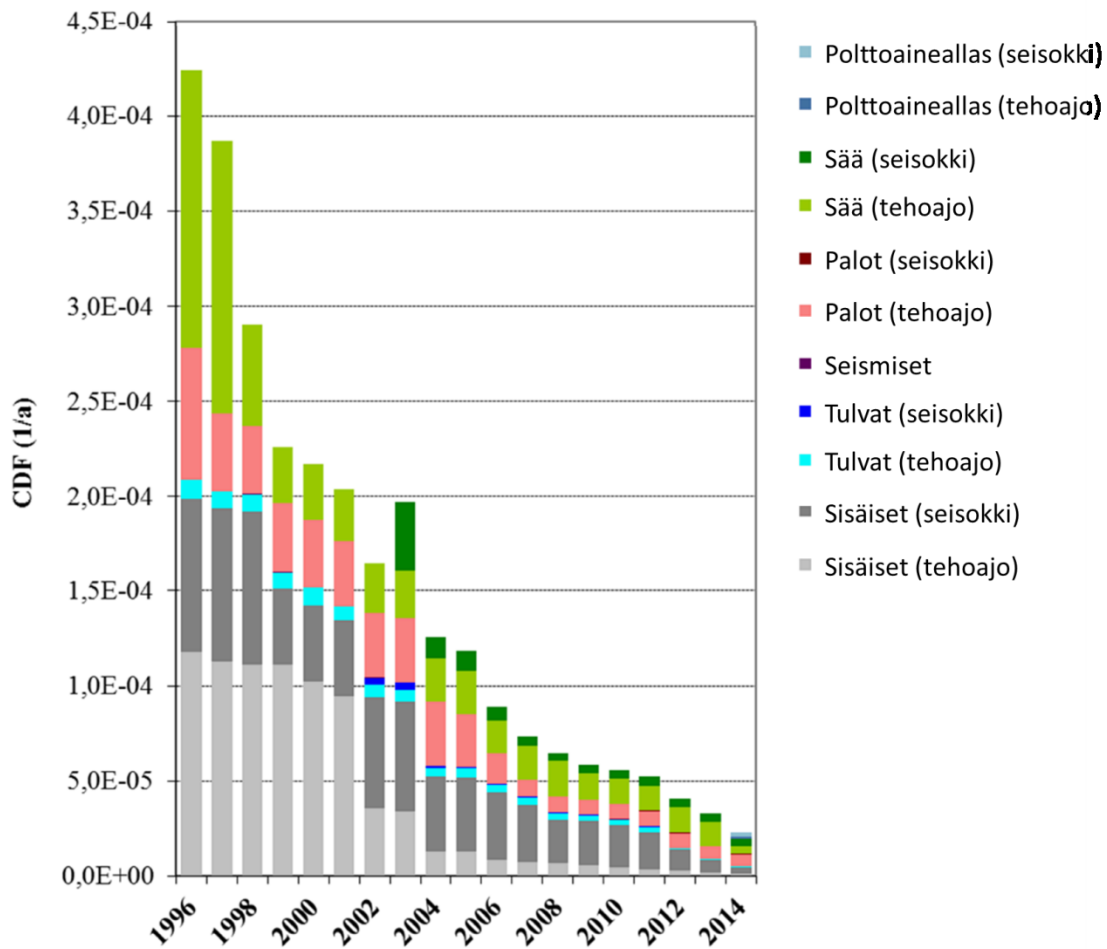
mään riskiä. PRA:n avulla pystytään myös arvioimaan onnettomuuksien synnyttämää vahinkoa terveydelle, turvallisuudelle ja ympäristölle sekä onnettomuuksien taloudellisia vaikutuksia. (Modarres, 2006)

Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:ssa on kaksi tasoa. Ensimmäisellä tasolla analysoidaan reaktorisydämen vaurioitumiseen johtavien onnettomuusketjujen todennäköisyydet. Toisella tasolla tarkastellaan suojarakennuksen vaurioitumista sydänvauriotilanteissa ja arvioidaan radioaktiivisten aineiden päästön määrää, todennäköisyyttä ja ajoittumista. Lisäksi PRA:ssa on kolmas taso, mitä ei tällä hetkellä analysoida Loviisan ydinvoimalaitoksella. PRA:n tasolla 3 arvioidaan radioaktiivisten aineiden päästön aiheuttamaa riskiä ihmisille ja ympäristölle. Kuvassa 2-5 on Lo1:n sydänvauriotaajuudet (CDF) vuosilta 1996 - 2014. Siitä näkee kuinka sydänvauriotaajuutta on saatu pienennettyä. (Jänkälä, et al., 2014b)

Loviisan ydinvoimalaitoksella on erikseen mallit Loviisan 1 ja 2 yksiköille. Vuoden 2014 riskitutkimuksen pääraporttien sydänvauriotaajuudet:

- Loviisa 1: $2,3 \cdot 10^{-5} \text{a}^{-1}$
- Loviisa 2: $2,5 \cdot 10^{-5} \text{a}^{-1}$ (Jänkälä, et al., 2014a)

PRA-mallin tapahtumat jaetaan alkutapahtumiin ja perustapahtumiin. Alkutapahtumalla tarkoitetaan häiriötä tai vikaa, joka edellyttää turvatoimintoja sydänvaurion estämiseksi. Alkutapahtumille arvioidaan PRA:ssa alkutapahtumataajuudet. Kaikki PRA-mallin onnettomuusketjut alkavat jostain alkutapahtumasta. Jokainen PRA:n alkutapahtuma aiheuttaa tehoajolla myös vähintään reaktorin pikasulun, joten kaikki alkutapahtumat pysäyttävät tuotannon. Perustapahtumien ja loogisten porttien avulla PRA:ssa mallinnetaan huipputapahtumien (ei toivottujen tapahtumien) syntyminen. Mallin perusteella voidaan laskea onnettomuusketjut. Perustapahtumille arvioidaan PRA:ssa todennäköisyydet, joiden arvioinnissa huomioidaan vikaantumistaajuuden lisäksi tapauksesta riippuen myös korjausajat, koestukseen ja huoltoihin liittyvät tiedot sekä vaatimukset toimivuudesta. Perustapahtumia ovat esimerkiksi hätäjähdytyksen pumppujen ja venttiilien epäonnistuneet toiminnot, kuten epäonnistunut käynnistyminen, epäonnistunut avautuminen, epäonnistunut sulkeutuminen ja aiheeton pysähtyminen. (Jänkälä, et al., 2014b)



Kuva 2-5. Loviisa 1 sydänvauriotaajuudet (CDF) vuosina 1996 - 2014 (Jänkälä, et al., 2014b).

PRA-mallin alkutapahtumat jaetaan sisäisiin ja muihin alkutapahtumiin. Sisäiset alkutapahtumat koskevat jotain Loviisan ydinvoimalaitoksen omaa komponenttia tai laitetta, esimerkiksi jokin tärkeä pumppu hajoaa tai jokin putki murtuu. Sisäiset alkutapahtumat jaetaan kolmeen ryhmään:

- Häiriöalkutapahtumat
- Jäähdytteenmenetystapahtumat
- Reaktiivisuusonnettomuudet

Jäähdytteenmenetystapahtumissa reaktorin jäähdytys menetetään ja pitää saada tilalle korvaavaa jäähdytystä. Reaktiivisuusonnettomuuksissa reaktoriin pääsee liian laimeaa vettä, joka aiheuttaa reaktiivisuuden kasvun. Häiriöalkutapahtumat sisältävät muita merkittäviä häiriöitä, jotka tietyissä olosuhteissa vaarantavat reaktorin jäähdytyksen.

Muut alkutapahtumat ovat prosessin ulkopuolisia alkutapahtumia, joissa syynä voi olla jokin muu kuin Loviisan ydinvoimalaitoksen oma laite tai komponentti. Myös osa ulkoisista alkutapahtumista on seurausta Loviisan ydinvoimalaitoksen oman laitteen häiriöstä. Ulkoiset alkutapahtumat jaetaan neljään ryhmään:

- Seismiset alkutapahtumat
- Paloalkutapahtumat
- Tulvatapahtumat
- Sääalkutapahtumat

Seismiset alkutapahtumat sisältävät maanjäristyksiä, joiden seurauksena voimalaitoksella vaurioituu laitteita. Paloalkutapahtumat sisältävät paloja. Tulvatapahtumissa vesi tulvii laitoksen sisällä vuotojen seurauksena. Sääalkutapahtumiin kuuluu esimerkiksi ukkonen, joka vaurioittaa laitteita, meriveden tulviminen ja jäähdytysveden saamisen vaarantava suppo.

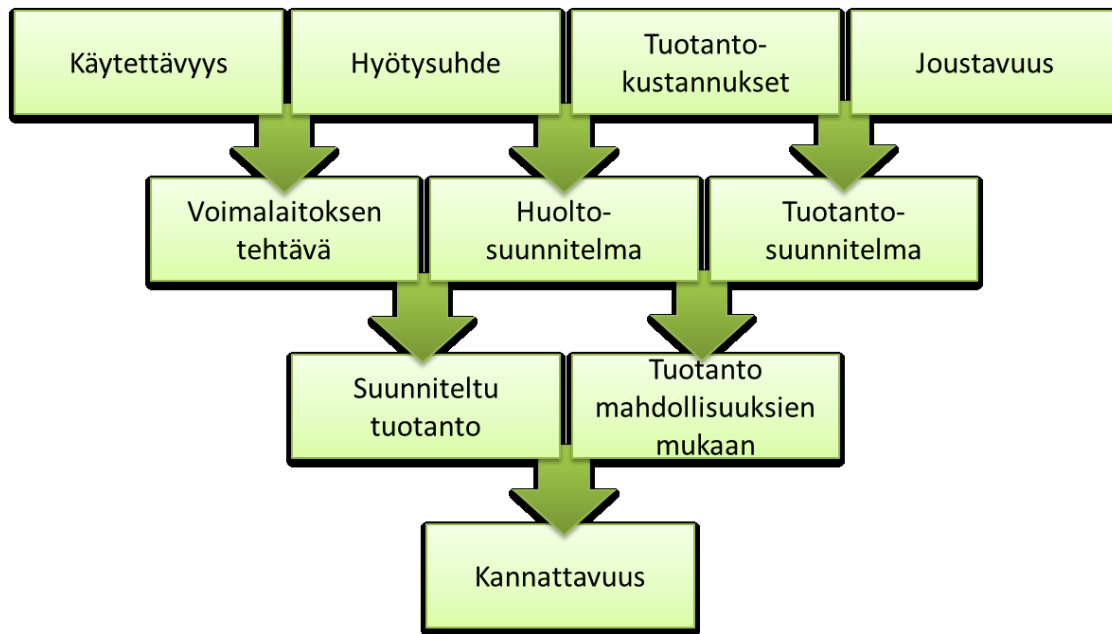
Luku 3

Käytettävyys

Käytettävyydelle on monia määritelmiä ja mittareita. Tässä työssä käytetään International Electrotechnical Commission (IEC) standardia käytettävyydelle. Käytettävyiden mittareille käytetään omia standardeja luvussa 3.1. IEC on kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio. IEC määrittelee käytettävyiden (engl. availability) standardissaan 60050 (IEC, 2015) seuraavasti: ”kyky toimia kuten vaaditaan”. Standardissa mainitaan lisäksi, että käytettävyys on erottamattomasti kytköksissä luotettavuuteen (reliability), palautumiskykyyn (recoverability) ja kunnossapidettävyyteen (maintainability). Käytettävyiden lavea määritelmä on yksi syy minkä takia käytettyä arvioidaan monien eri mittareiden avulla. Tärkeimpiä voimalaitosten käytettyä mittareita listataan luvussa 3.1. IEC:n standardista näkee myös, että käytetty määritellään eri tavalla eri toimialoilla. Tässä työssä käsitellään yhden voimalaitosyksikön suorituskykyyn liittyvää käytettyä. Käytetty määritellään lisäksi eri tavalla riippuen huomioidusta ajankohdasta. On erikseen esimerkiksi hetkellinen käytetty, raja-arvoinen käytetty ja keskimääräinen käytetty. Tässä työssä käytetään raja-arvoista käytettyä. Käytettyä ajankohtariippuvuutta käsitellään enemmän luvussa 3.3.1.

Käytetty suorituskyvyn mittarina

World Energy Council (WEC) laskee (WEC, 2004) käytettyä yhdeksi voimalaitoksen suorituskyvyn mittariksi. WEC on arvioinut vuosina 2004, 2008 ja 2010 suorituskyvyn mittaamista voimalaitoksilla. Suorituskykyyn liittyen WEC arvioi sopivaa tuotanto- ja siirtokapasiteetin määrää sekä muita suorituskykyyn liittyviä haasteita. Vuoden 2004 versio valitaan tähän työhön kuvaamaan käytettyä suorituskyvyn mittarina. WEC:n huomioimien haasteiden määrä kasvaa uudemmissa raporteissa.



Kuva 3-1. Voimalaitosten suorituskyvyn mittarit (WEC, 2004).

Vuonna 2004 WEC arvioi voimalaitoksen suorituskyvyn (engl. performance) riippuvan käytettävyyden (availability) lisäksi hyötysuhteesta (efficiency), tuotantokustannuksista (production costs) ja tuotannon joustavuudesta (flexibility). Näiden mittareiden perusteella voidaan vertailla voimalaitoksia, määrittää investointien kannattavuutta ja arvioida, minkälaisia parannuksia käytössä olevaan voimalaitokseen voidaan tehdä. WEC luokittelee voimalaitokset eri ryhmiin, joita kaikkia tarvitaan kannattavassa energiantuotannossa. Hyvään suorituskykyyn vaaditaan siis hyvien yksittäisten mittareiden lisäksi tarvetta juuri kyseisen tyyppiselle voimalaitokselle. Suorituskyvyn mittareiden perusteella määritellään voimalaitoksen rooli (plant role), huoltosuunnitelma (outage plan) ja tuotantostrategia (operational strategy). Näiden perusteella tuotanto jaetaan vielä kahteen ryhmään: suunniteltu tuotanto (planned production) ja tuotanto, joka otetaan käyttöön vasta hinnan kasvaessa riittävästi (opportunity based production). Tuotantosuunnitelma ja siinä onnistuminen vaikuttavat vielä kannattavuuteen (profitability). Kaikkia näitä tarvitaan ja ne yhdessä muodostavat suorituskyvyn. Kuva 3-1 havainnollistaa WEC:n voimalaitosten suorituskyvyn mittareiden luokittelua. (WEC, 2004)

3.1 Käytettävyyden mittarit

Hyvä käytettävyys tarkoittaa eri tilanteissa eri asioita. Tästä syystä käytettävyydelle on useita mittareita, jotka kaikki ovat tärkeitä. Tässä työssä käytettävyyden päämittarina käytetään käyttökerrointa. Tässä luvussa annetaan laaja kuva eri yhteyksissä käytössä olevista käytettävyyden mittareista, mitä ne kertovat, kuinka ne määritellään ja

kuinka ne eroavat käyttökertoimesta. Osa näistä mittareista luokitellaan suorituskyvyn (engl. performance) mittareiksi osassa lähteistä. Myös Loviisan ydinvoimalaitoksella vuosittain raportoidaan usean käytettävyyssmittarin arvot. Esimerkiksi Loviisan käytöyksikön vuosiraportissa vuodelta 2013 (Eurasto, 2014b) luetellaan tuotantomäärien lisäksi käyttökerroin ja aikakäytettävyys.

Voimalaitosten käytettävyyssmittarien standardeja löytyy esimerkiksi seuraavista lähteistä:

- ANSI (American National Standard Institute) / IEEE (Institution of Electrical and Electronics Engineers): Amerikan yhdysvaltojen kansallinen standardoinnin organisaation (ANSI) hyväksymä standardi. Standardia ylläpitää kansainvälinen tekniikan alan järjestö IEEE. Standardin uusin versio sähkön-tuotannon luotettavuuden (engl. reliability), käytettävyyden (availability) ja tuottavuuden (productivity) raportoinnin määrittelylle, IEEE Std 762™-2006, on julkaistu vuonna 2007 (IEEE, 2007). Standardissa määritellään 25 erilaista yhden tuotantoyksikön mittaria. Lisäksi standardi määrittää 44 erilaista useamman yksikön yhteistä mittaria.
- IAEA (International Atomic Energy Association): kansainvälinen atomienergiajärjestö (IAEA) ylläpitää tuotantotappioiden rekisteröintijärjestelmää ydinvoimalaitoksille. Järjestelmän nimi on PRIS (Power Reactor Information System). Myös Suomi on IAEA:n jäsen ja siten myös Loviisan ydinvoimalaitos dokumentoi IAEA:lle tuotantotappiot ja IAEA:n palvelut ovat käytössä Loviisan ydinvoimalaitokselle. (IAEA, 2004a)
- WANO (World Association of Nuclear Operators): kansainvälinen ydinvoimaa operoivien yhtiöiden liitto (WANO) ylläpitää omaa indikaattoriohjetta (WANO, 2010). Fortum on WANO:n jäsen.
- Fortumilla on myös omia ohjeita käytettävyyssmittareista, esimerkiksi IVO:n aikainen luotettavuusohje (Tarkiainen, 1990).
- Miriam RAM Studio -ohjelmistoa käytetään käytettävyyden analysointiin tässä työssä, joten myös tämän ohjelman määritelmiä käytettävyyssmittareille listataan ja verrataan standardeihin. Miriam RAM Studion käytettävyyssmittarit määritellään standardissa NORSOK Z-016 (Miriam, 2015).

Eri standardit määrittelevät tuotantotappiot hieman eri tarkkuudella ja tästä luokituksesta riippuu myös käytettävyyssmittarien tarkat määritelmät. Tässä työssä luetellaan kaikki IAEA:n energiamääriin perustuvat käytettävyyssmittarit, jotka antavat kohtuullisen kokonaiskuvan. Osa käytettävyyssmittareista perustuu aikaan tai tapahtumamää-

riin, myös tällaisista mittareista annetaan muutama esimerkki. Eri lähteiden käytettävyyssmittareita verrataan toisiinsa ja jokaisesta mittarista ilmoitetaan myös tarvittavia huomioita. Käytettävyyssmittarit määritellään eri lähteissä eri tavalla ja eri nimisiksi, joten mittareita ei erikseen suomenneta.

Tässä työssä käytettävyyden mittarit jaetaan kolmeen pääluokkaan laskentatavan perusteella. Laskenta perustuu aikaan, energiaan tai tapahtumamääriin.

3.1.1 Tuotantotaikaan perustuvat käytettävyyssmittarit

Aikaan perustuvissa mittareissa verrataan voimalaitoksen tuotantoaikaa johonkin vertausaikaan. Tässä esitellään kaksi mittaria, jotka vertaavat kahta erilaista tuotantoaikaa kokonaistarkastelu-aikaan. IEEE:n standardi (IEEE, 2007) määrittää 23 erilaista tuotantoaikaan perustuvaa usean tuotantoyksikön yhteismittaria.

Operation factor (OF)

Operation factor (*OF*) kuvaa aikaa jolloin voimalaitosyksikkö tuottaa energiaa valtakunnan verkkoon t ja vertaa sitä tarkasteluajanjakson kokonaispituuteen T . Tuotantoaika t on riippumaton tuotannon suuruudesta. Esimerkiksi Loviisan ydinvoimalaitoksella yhden yksikön tuotantoajaksi lasketaan kaikki hetket, kun jompikumpi generaattori on verkossa. *OF* lasketaan kaavalla

$$OF(\%) = \frac{t}{T} \cdot 100 \ %.$$

OF mittarin nimet eri standardeissa: IAEA ”operation factor”, Miriam RAM Studio ”on-stream availability” ja ANSI/IEEE ”service factor”. Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöyksikön vuosiraporttien aikakäytettävyys vastaa *OF* käytettävyyssmittaria. Huomautus: IEEE:n standardissa T ei vastaa kokonaisaikaa vaan aktiivisenaoloaikaa (period hours). Voimalaitosyksikkö saattaa olla esimerkiksi pitkäaikaissäilytyksessä, kuten osa Inkoon voimalaitoksen yksiköistä vuonna 2015. Pitkäaikaissäilytyksessä oleva yksikkö ei ole aktiivisena.

Demand availability (DA)

Demand availability (*DA*) on Miriam RAM Studiosta löytyvä käytettävyyssmittari joka kuvaa aikaosuutta, jolloin on pystytty tuottamaan haluttu tai vaadittu määrä energiaa. Tällöin ei ole ollut tuotantotappiota, joita ei pystytä kompensoimaan. *DA* lasketaan kaavalla

$$DA(\%) = \frac{t_d}{T} \cdot 100 \ %,$$

missä t_d on aika tunneissa jolloin tuotanto vastaa suunniteltua tuotannon määrää (Miriam RAM Studio: demand throughput rate). Kyseistä käytettävyyssmittaria ei ole käytössä IAEA:lla eikä IEEE standardeissa. Muut lähteet eivät tunne termiä t_d .

3.1.2 Tuotettuun energiaan perustuvat käytettävyyssmittarit

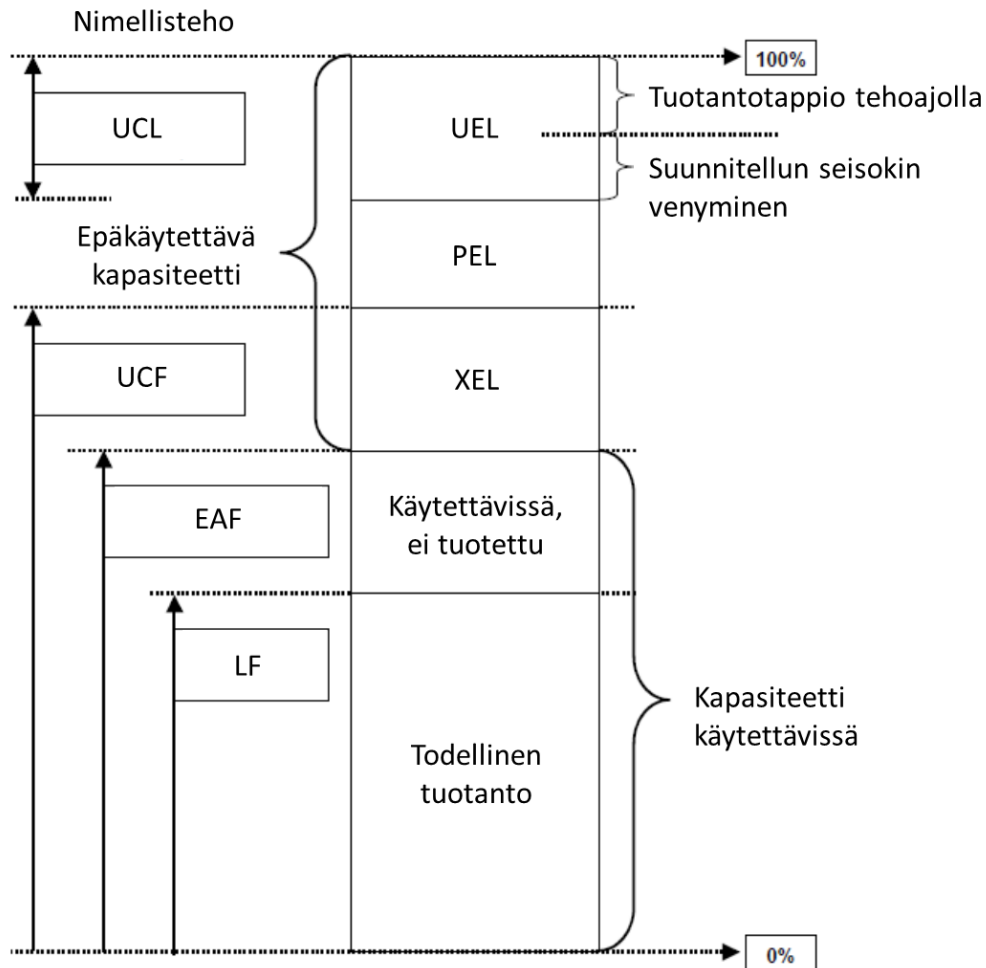
Käytettävyyssmittarien toinen pääluokka on energiaan perustuvat mittarit. Näissä verrataan tietyissä tilanteissa tuotettua energiaa erilaisiin nimellisenergioihin. Energiaan perustuvista mittareista käydään läpi tarkemmin IAEA:n käyttämät mittarit. IEEE:n standardi (IEEE, 2007) määrittää 21 erilaista tuotettuun energiaan perustuvaa usean tuotantoyksikön yhteismittaria. Kuvassa 3-2 näkyy IAEA:n energiakäytettävyyssmittarit toisiinsa suhteutettuna. Kuvassa 3-3 on esimerkki voimalaitoksen tuotantokäyrästä. Kuvasta 3-3 näkee myös miten IAEA jakaa tuotantotappiot suunnittelemattomiin, suunniteltuihin ja ulkoisiin. Kuvassa 3-3 näkyy myös miten nimellisteho eroaa toteutuneesta tuotantotehosta.

Unplanned capability loss factor (UCL)

Unplanned capability loss factor (*UCL*) vertaa suunnittelemattomia tuotantotappiota nimellisenergiaan. Tuotantotappioiden määrä suunnittelemattomista tuotantotappioista *UEL* (unplanned energy losses) jaetaan vastaavana aikana tuotettavissa olevalla nimellisenergialla *REG* (reference energy generation)

$$UCL(\%) = \frac{UEL}{REG} \cdot 100 \, \%.$$

REG vastaa voimalaitoksen suunniteltua tuotantotehoa keskimääräisissä olosuhteissa. Esimerkiksi Loviisan ydinvoimalaitoksella nimellisenergian määrittämisessä käytetään IAEA:n ja WANO:n määritelmiä nimellisenergiasta (Lahti, 2011). IAEA jakaa suunnittelemattomat tuotantotappiot kahteen pääluokkaan sen mukaan tapahtuvatko tuotantotappiot tehoajolla (IAEA: forced outage) vai seisokissa (extension of planned outage). Seisokin suunnittelemattomissa tuotantotappioissa suunnitellut tuotantotappiot kestävät suunniteltua pidempään. Suunnittelemattomien tuotantotappioiden ryhmiä ei huomioida erikseen *UCL* käytettävyyssmittarissa. IEEE:llä vastaava käytettävyyden mittari on ”equivalent unplanned outage factor”. Huomio: IAEA ja IEEE eivät ota kantaa, käytetäänkö netto- vai bruttotuotantotehoja. Yhtenevästi on käytettävä jompaa kumpaa.



Kuva 3-2. IAEA:n energiamääriin perustuvat käytettävyyssmittarit toisiinsa suhteutettuna.

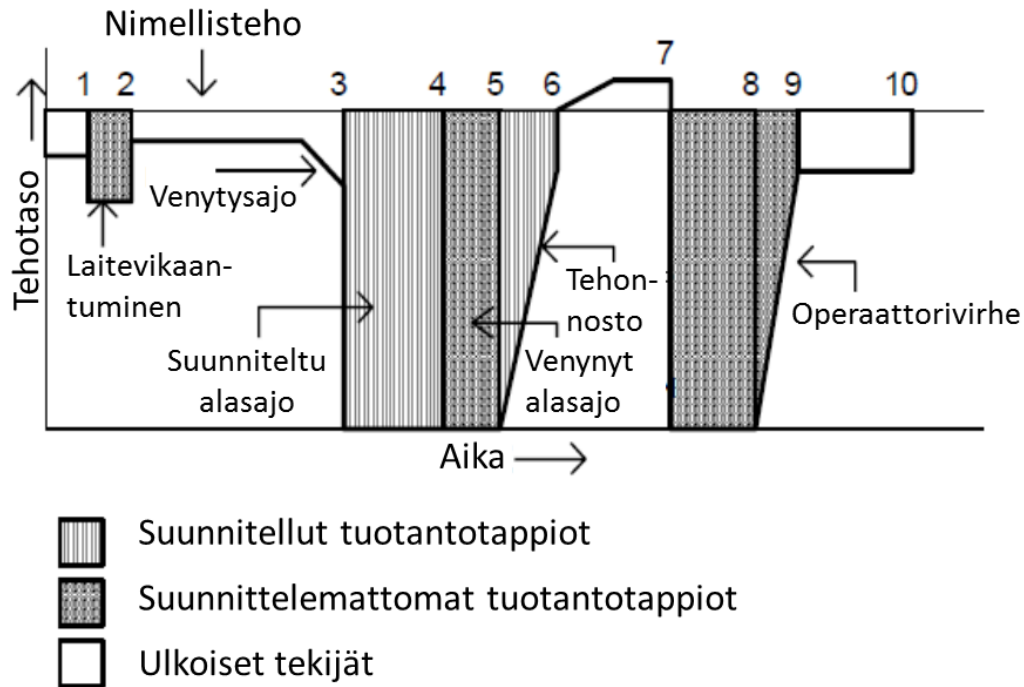
Unit capability factor (UCF)

Unit capability factor (*UCF*) vertaa energiaa, joka olisi tuotettavissa ilman ulkoisia tuotantotappioita nimellisenergiaan tarkastelujaksolla. *UCF* lasketaan kaavalla

$$UCF(\%) = \frac{REG - PEL - UEL}{REG} \cdot 100 \%,$$

missä *PEL* (planned energy losses) on suunnitellut tuotantotappiot. *UCF* kuvaa voimalaitoksen käytön tehokkuutta, koska tässä ei huomioida ulkoisia tuotantotappioita, joita ei pystytä hallitsemaan. Ulkoinen tuotantotappio on esimerkiksi meriveden korkea lämpötila. IEEE ei huomioi samalla tavalla ulkoisia tuotantotappioita, joten sen

standardissa ei ole vastaavaa käytettävyyden mittaria. Huomio: IAEA ei ota kantaa käytetäänkö netto- vai bruttotuotantotehoja. Yhtenevästi on käytettävä jompaakumpaa.



Kuva 3-3. Esimerkki voimalaitoksen tuotantokäyrästä. Kuvassa näkyy myös miten tuotantotappiot jakautuvat suunniteltuihin, suunnittelemattomiin ja ulkoisiin ja kuinka väliaikaisesti voimalaitos voi ylittää nimellistehonsa.

Energy availability factor (EAF)

Energy availability factor (EAF) vertaa käytössä olevalla kapasiteetilla tuotettavissa olevaa energiaa nimellisenergiaan tarkastelujaksolla. Tuotantotappioita on IAEA:n mukaan suunniteltuja, suunnittelemattomia ja ulkoisia. UCF mittariin verrattuna nyt huomioidaan myös ulkoiset tuotantotappiot. Ulkoiset tuotantotappiot *XEL* eivät ole voimalaitoksen käyttöhenkilökunnan hallittavissa. Ulkoisia tuotantotappioita ovat esimerkiksi huonot ympäristöolosuhteet, lakot, venytysajo, kausivaihtelut kuten meriveden lämpötila ja polttoaineen saatavuusongelmat. EAF mittarissa tuotantotappioiksi ei huomioida tuotantoa, joka olisi ollut tuotettavissa, mutta ei jostain ulkoisesta syystä johtuen tuotettu. IAEA ei erikseen nimeä tällaisia tuotantotappioita. Tällaisia tuotannon alentamisen syitä ovat esimerkiksi tehon rajoitukset pienen kulutuksen takia, taa-

juuden kontrollointi, verkon säädöt ja varareservinä oleminen. *EAF* lasketaan seuraavalla yhtälöllä,

$$EAF(\%) = \frac{REG - PEL - UEL - XEL}{REG} \cdot 100 \, \%.$$

IEEE:n lähin vastaava käytettävyyssmittari on "equivalent availability factor". Huomioita:

- IAEA ja IEEE eivät ota kantaa käytetäänkö netto- vai bruttotuotantotehoja. Yhtenevästi on käytettävä jompaakumpaa.
- EAF on periaatteellisesti sama IAEA:lla ja IEEE:llä, mutta tuotantotappioiden jaottelu suunniteltuihin, suunnittelemattomiin ja ulkoisiin eroavat toisistaan.

Load factor (LF)

Load factor (*LF*) vertaa tuotettua energiaa nimellisenergiaan tarkastelujaksolla. *LF* mittarissa tarkastelujaksolla tuotettu energia *EG* jaetaan nimellisenergialla

$$LF(\%) = \frac{EG}{REG} \cdot 100 \, \%.$$

Vastaavat käytettävyyssmittarit eri lähteistä: IAEA:lla "load factor", Miriam RAM Studiossa "production availability" ja IEEE:llä "gross capacity factor". Myös Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöyksikön vuosiraporttien käyttökerroin sekä IVO:n luotettavuusohjeen käyttökerroin vastaavat *LF* käytettävyyssmittaria. Huomioita:

- Miriam RAM Studion versiossa 1.01 "production availability" ei kaikissa tilanteissa vastaa käyttökerrointa. Miriam RAM Studiossa suunniteltuja huoltoja (planned maintenance) ei huomioida nimellistuotannossa eikä niiden määrä myöskään pienennä käyttökerrointa. Tästä syystä käyttökertoimen saaminen tulokseksi vaatii, että suunnitellut huollot määritetään vikoina eikä suunniteltuina huoltoina johon ohjelmasta löytyy oma vaihtoehto.
- IAEA ja Miriam RAM Studio eivät ota kantaa, käytetäänkö netto- vai bruttotuotantotehoja. Yhtenevästi on käytettävä jompaakumpaa.
- IEEE:llä on erikseen käyttökerroin nettoenergialle "net capacity factor".

Muita energiaan perustuvia käytettävyyssmittareita

Kaikki IAEA:n käytettävyyssmittarit vertaavat energiamääriä nimellisenergiaan. Energiamääriä voi verrata myös muunlaisiin energiamääriin. Tässä käydään läpi muutamia esimerkkejä minkä tyyppisiä muita energiamääriin perustuvia käytettävyyssmittareita on olemassa IVO:n luotettavuusohjeessa, Miriam RAM Studiossa ja IEEE:llä.

IVO:n luotettavuusohjeessa määritellään esimerkiksi ”revisioiden ulkopuolinen käytettävyys” ja ”käytönaikainen käytettävyys”, joissa ei huomioida koko vuoden mittarissa koko vuoden nimellistehoa vaan vain osa siitä. Miriam RAM Studio määrittelee erikseen käytettävyysmittarin ”deliverability”. Tässä tuotettu energia jaetaan nimellisenergialla, mutta tuotetussa energiassa ei huomioida tuotantotappiona sellaista tuotantotappiota, joka pystytään korvaamaan jollain muulla tuotannolla tai varaston käytöllä. IEEE:n suurempi määrä käytettävyysmittareille johtuu siitä että se määrittää tarkemmin tai eri tavalla tuotantotappiot. IEEE määrittelee esimerkiksi 21 erilaista aikakäsitettä tai aikamittaa joita käytetään käytettävyysmittareissa. IEEE määrittelee myös 7 erilaista tuotannon määrää kuvaavaa termiä. IEEE määrittelee lisäksi eri mittarit yksittäiselle tuotantoyksikölle ja usean yksikön yhteiselle tuotannolle.

3.1.3 Tapahtumamääriin perustuvat käytettävyysmittarit

Käytettävyysmittarien viimeinen pääluokka on tapahtumamääriin perustuvat mittarit. Tästä luokasta tarkasteluun otetaan mukaan kaksi IVO:n luotettavuusohjeessa määritettyä mittaria, käynnistyvyys ja käyntivarmuus (Tarkiainen, 1990). Tällaiset viat voidaan arvioida omiksi vikatyypeikseen, jotka eivät tule riittävän hyvin huomioitua aiemmin määritellyissä käytettävyyden mittareissa. IAEA:n tapahtumamääriin perustuvia mittareita ovat esimerkiksi UA7 ja UM7. Nämä mittarit kuvaavat ydinvoimalaitosten manuaalista (UM7) ja automaattista (UA7) reaktorin pikasulkujen lukumääriä tietyssä ajassa. Myös tällaiset tapahtumat eivät tule huomioitua aiemmin esitellyillä käytettävyysmittareilla.

Käynnistyvyys

$$k_{LS} = \frac{\text{onnistuneet käynnistykset}}{\text{käynnistysten lukumäärät}}$$

Käyntivarmuus

$$k_{DP} = \frac{\text{onnistuneet startit} - \text{viat}}{\text{käynnistysten lukumäärät}}$$

3.2 Kirjallisuuskatsaus käytettävyysanalyyseistä

Reliability assessment of the Coronado generating station

Luotettavuus- ja käytettävyysanalyysin kohteena oli kivihiihivoimalaitos Coronadossa, Kalifornian osavaltiossa USA:ssa (EPRI, 2003). Tämä analyysi on esimerkki työstä, jossa käytetään osittain voimalaitoksen omaa historiaa ja vikapuita osana käytettävyysanalyysiä. Työssä käytettiin voimalaitoksen omaa tuotantotappio- sekä vikaantumistietoa vuosilta 1996 - 2000. Lisäksi käytettiin yleisdataa muilta kivihiihivoima-

laitoksilta sekä ydinvoimalaitoksilta. Työssä mallinnettiin voimalaitoksen toimintaa ja sen perusteella arvioitiin käytettävyyttä ja luotettavuutta. Tuloksena saatiin:

- Monia käytettävyyden, luotettavuuden ja suorituskyvyn mittareita.
- Taajuudet ja seuraukset kaikille mallinnetuille skenaarioille. Seurauksiin kuuluu seisokin pituus, tuotantotappiot ja kustannukset korvaavasta tuotannosta.
- Järjestelmien ja komponenttien vaikutukset käytettävyyden, luotettavuuden ja suorituskyvyn mittareihin. Eli saatiin selville merkittävimmät riskien, kuten tuotantotappioiden, syyt.

Mallinnus perustui vikapuihin ja järjestelmien viat huomioitiin tapahtumina. Työssä käytettiin ohjelmistoja SAPHIRE ja PLANTFORMA. PLANTFORMA-ohjelmistolla luotiin koko voimalaitoksen luotettavuus- ja käytettävyyshmalli. Seuraavat tuotantoon liittyvistä järjestelmistä mallinnettiin tarkemmin vikapuilla SAPHIRE-ohjelmassa:

- Hiilen muokkaus ja käsittely
- Lento- ja pohjatuhkan käsittely

Tarkemmin mallinnetut järjestelmät valittiin voimalaitoksen historiatietojen perusteella, näissä järjestelmissä tiedettiin olevan merkittävästi tuotantotappioita. Myös loput järjestelmät huomioitiin, jotta tuotantomääriä pystyttiin vertaamaan historiallisiin tuotantomääriin. (EPRI, 2003)

Sequoyah nuclear power plant availability and safety assessment

Tässä EPRI:n raportissa vuodelta 1983 arvioidaan kaksi vuotta aiemmin käynnistetyn Sequoyah ydinvoimalaitoksen käytettävyyttä ja sydänvauriotaajuutta (Mulvihill, et al., 1983). Ydinvoimalaitos sijaitsee Hamilton County:ssa, Tennesseeen osavaltiossa USA:ssa. Raportin tarkoituksena oli käytettävyyden ja sydänvauriotaajuuden arvioimisen lisäksi testata EPRI:lle kehitetyn uuden menetelmän ”GO methodology” toimivuutta.

Raportti havainnollistaa, kuinka saman voimalaitoksen käytettävyyden ja riskin arviointiin käytettiin samoja menetelmiä. Menetelmät olivat samoja, mutta menetelmien avulla rakennettiin eri mallit käytettävyydelle ja sydänvauriotaajuudelle. Myös samaa dataa käytettiin molemmissa analyysissä. Molempia analyysijä varten datalle kerättiin vikaantumis- ja korjausajat. Kaikkia samoja vikaantumisia ei huomioitu molemmissa analyysissä, molemmissa oli joitain sellaisia vikaantumisia, joita ei ollut toisessa. Analyysissä oli mukana myös yhteisiä vikaantumisia. Tässä raportissa päädyttiin käyttämään yleisdataa vikaantumisista muilta ydinvoimalaitoksilta, vaikka analyysin kohteena ollut voimalaitos oli ollut käytössä jo yli kaksi vuotta. Käytössä oleva

raportti on väliraportti eikä sisällä lopullisia analyysin tuloksia. Lopullinen raportti ei ole saatavilla EPRI:n nettisivuilla. (Mulvihill, et al., 1983)

VVER-91 availability analysis during preliminary design

Käytettävyyssanalyysi suunnitteilla olleelle VVER-1000 ydinvoimalaitokselle vuonna 1990 havainnollistaa käytettävyyssanalyysia suunnitteilla olevalle ydinvoimalaitokselle (Jänkälä & Taskinen, 1991). Tämä myös sisältää arvioita suurista käytettävyyssriskeistä, joista aiheutuu pitkiä seisokkeja, mutta niitä tapahtuu harvoin. Analyysin tarkoituksena oli arvioida, saavuttaako VVER-1000 ydinvoimalaitosyksikkö halutun käyttökertoimen. Käyttökerroin arvioitiin erikseen tavanomaiselle vuodelle ja koko käyttöiälle. Tavanomaisen vuoden käyttökerroin vastasi tavoiteltua, mutta koko käyttöiän käyttökerroin oli hieman tavoiteltua pienempi. Näiden eri tilanteita kuvaavien käyttökertoimien eroksi saatiin noin 5 %-yksikköä. Käyttökertoimien erot selittyivät seuraavilla tekijöillä:

- Osa vuosihuolloista on pidempiä, jolloin koko käyttöiän keskimääräinen vuosihuolto on 250 tuntia pidempi kuin lyhyen seisokin vuonna. Ilman pidempiä vuosihuoltoja käyttökerroin olisi ollut koko käyttöiälle tavoitteen mukainen.
- Koko käyttöiän käyttökertoimessa huomioidaan myös harvinaisia tuotantotappioita, joita ei satu joka vuosi ja osaa ei edes kertaakaan keskimäärin koko käyttöaikana. Useat näistä aiheuttaa kuitenkin pitkiä seisokkeja ja sen takia ne pienentävät merkittävästi käyttökerrointa. Useita näistä oli lisäksi vaikea identifioida tietyille komponentille tai järjestelmälle.

Työssä havaittiin että merkittävimpiä tuotantotappioiden aiheuttajia olivat vuosihuolto ja pitkiä seisokkeja aiheuttavat harvinaiset tuotantotappiot. Tällaisia pitkiä seisokkeja aiheuttaneita tuotantotappiota oli sattunut myös Loviisan ydinvoimalaitoksella vuosina 1979 ja 1980.

Mallinnuksessa käytettiin käytettävyysslohkokaavioita ja osalle lohkoista mallinnettiin vikaantumiset vikapuina. Aineistona käytettiin yleisdataa ydinvoimalaitoksilta sekä muutaman yksittäisen ydinvoimalaitoksen historiaa. Data koostui komponenttien vikaantumis- ja korjausajoista. Mallinnus suoritettiin UNIRAM-ohjelmalla. (Jänkälä & Taskinen, 1991)

Optimized capacity: global trends and issues

World Nuclear Association:n (WNA) raportti pohjautui IAEA:n PRIS tietokantaan ja siinä arvioitiin käytössä olevan ydinvoiman tilaa ja suurimpia haasteita vuonna 2010

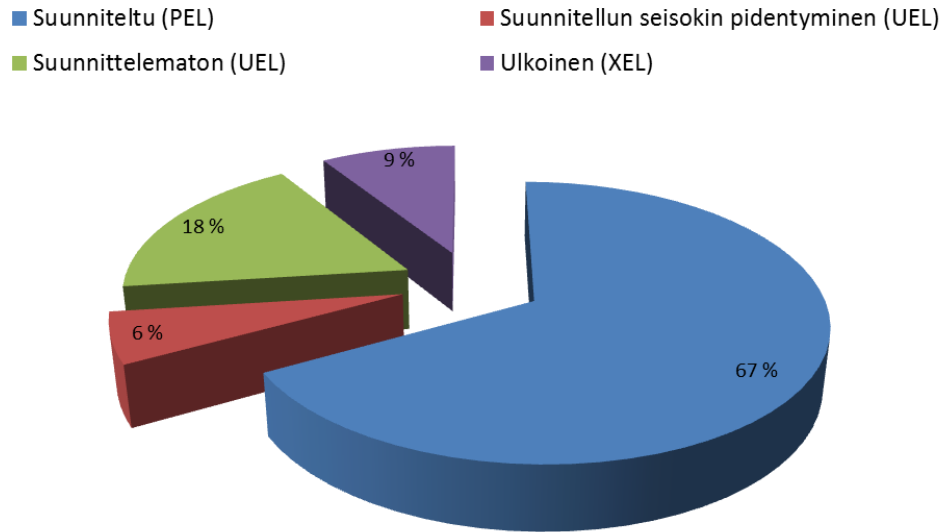
(WNA, 2012). Raportissa havaitaan että suurin syy matalaan käyttökertoimeen monilla ydinvoimalaitoksilla on pitkä vuosihuolto.

WNA:n raportissa käytetään IAEA:n määritelmiä käytettävyyssmittareille. Raportissa kiinnitetään huomiota käyttökertoimien (load factor) parantumiseen merkittävästi vuosina 1980 - 2000, mutta käyttökertoimien kasvaminen on lähes pysähtynyt 2000-luvulla. 2000-luvulla käyttökertoimet olivat mediaaniarvoltaan lähes 85 %, kun parhaimmat käyttökertoimet olivat yli 95 %. Raportissa huomiodaan että eri ydinvoimalaitostekniikat asettavat rajoituksia käyttökertoimien kasvulle. Raportissa kuitenkin todetaan, että hyviä yli 95 % käyttökertoimia löytyy joka mantereelta ja lähes kaikilta reaktorityypeiltä, joten kehitettävää on edelleen käyttökertoimissa.

Käyttökertoimien lisäksi raportti arvioi suurimpia tuotantotappioiden syitä ydinvoimalaitoksissa. Raportin mukaan 94 % tuotantotappioista on suunniteltuja polttoaineen vaihtoseisokkeja sekä määräaikaishuoltoja, joten ydinvoimalaitosten käytettävyyttä voidaan parantaa erityisesti optimoimalla suunniteltuja tuotantotappioita. Kuvassa 3-4 näkyy kuinka tuotantotappiot ydinvoimalaitoksissa jakaantuvat suunniteltuihin (IAEA: *PEL*), suunnittelemattomiin (*UEL*) ja ulkoisiin (*XEL*). Suunnittelemattomat tuotantotappiot jakaantuvat vielä suunniteltujen tuotantotappioiden venymiseen ja suoriin tuotantotappioihin tehoajolla.

Vuonna 2010 parhaat 10 % BWR (kiehutusvesireaktori) ja PWR ydinvoimalaitoksien vuosihuolloista kestivät alle 26 päivää, kun keskiarvo oli noin 54 päivää. Eli huonon käyttökertoimen pääsyy useilla ydinvoimalaitoksilla on pitkä vuosihuolto. Suurimmat suunnittelemattomat tuotantotappiot voimalaitoksen järjestelmien vikaantumisista johtuivat seuraavista komponenteista, tärkeimmät ensimmäisenä:

- turpiinit ja apulaitteet
- sähkö- ja generaattorijärjestelmät. (WNA, 2012)



Kuva 3-4. Ydinvoimalaitosten tuotantotappioiden jakaantuminen suunniteltuihin, suunnittelemattomiin ja ulkoisiin (WNA, 2012).

Cost drivers for the assessment of nuclear power plant life extension

IAEA:n raportissa vuodelta 2002 arvioidaan ydinvoimalaitosten käyttöajan pidentämisen kustannuksia ja merkittävimpiä käyttöajan pidentämisen kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä ja komponentteja (IAEA, 2002). Raportin näkökulma on nimenomaan kannattavuus. Raportti ei sisällä menetelmiä turvallisuuden ja käytettävyyden varmistamiseen ydinvoimalaitosten käyttöiän pidennyksissä. Raportti ei varsinaisesti liity käytettävyyteen, mutta käyttöikä vaikuttaa suurten riskien aiheuttamaan epäkäytettävyyteen. Lisäksi jos jokin suuri riski toteutuu, niin ei ole ollenkaan varmaa, otetaanko voimalaitosta enää käyttöön. Voimalaitoksen käyttöönotto on usein mahdollista myös suurten käytettävyyseriskien toteutuessa, mutta se saattaa maksaa niin paljon, ettei voimalaitosta kannata korjata ja ottaa käyttöön. IAEA (2002) käsittelee seuraavia asioita ydinvoimalaitoksen käyttöiän pidentämisestä:

- Identifioi ja selventää kustannuselementtejä ja -tekijöitä.
- Esittää menetelmiä kustannusten arviointiin.
- Esittää kustannusdataa.

Kustannusdatassa on eriteltyä komponenttien kustannukset sekä muut kustannukset kuten dokumentointi, lisensointi ja muut kustannukset. Kustannusdata on kerätty jäsenvaltioilta pääasiassa asiantuntija-arvioin. Tuloksia ei esitetä maakohtaisesti, vaikka maiden välillä on merkittäviä eroja. Kyseisillä kustannusarvioilla pystyy arvioimaan

kannattavuutta myös ydinvoimalaitoksen korjauksille suurten käytettävyyseriskien toteutumisen jälkeen. On myös mahdollista kerätä kustannusarvioita suoraan suurten riskien korjaamiselle. Raportti sisältää myös arviot kriittisimmistä komponenteista PWR ja PHWR (raskaan veden painevesireaktori) ydinvoimalaitoksilla, mitkä vaikuttavat käyttöiän pidentämisen kannattavuuteen. (IAEA, 2002)

3.3 Analyttinen käytettävyysslaskenta

Tässä luvussa käydään läpi analyttisessä käytettävyysslaskennassa tarvittavia menetelmiä ja käytettyjä oletuksia. Menetelmiä käydään läpi vain tässä työssä tarvittavilta osin. Ensin käydään läpi oletukset tai yksinkertaistukset liittyen huoltostrategiaan ja komponenttien käytettävyyden tyyppiin ja sen jälkeen käydään läpi laskentaa liittyen järjestelmän ja komponenttien käytettävyyteen ja epäkäytettävyyteen.

3.3.1 Yksinkertaistukset

Yksinkertaistuksissa otetaan kantaa huoltostrategioihin, komponenttien käyttötapaan ja käytettävyyden tyyppiin. Ensin huomioidaan huoltostrategian yksinkertaistukset. Huoltostrategia vaikuttaa komponentin ja järjestelmän käytettävyyteen. Esimerkiksi Loviisan ydinvoimalaitoksella on viisi erilaista kunnossapidon strategiaa, joista kaikki johtavat erilaiseen käytettävyyteen samalla komponentilla. Loviisan ydinvoimalaitoksen kunnossapidon strategioista löytyy lisätietoja luvusta 2.2. Tämän työn analyttisessä käytettävyysslaskennassa oletetaan, että kaikkien komponenttien vikaantumiset havaitaan ja korjaaminen aloitetaan heti. Lisäksi korjaajia oletetaan olevan rajattomasti niin, että vaikka tapahtuisi kuinka monta samanaikaista vikaantumista, niin niiden korjaaminen aloitetaan välittömästi.

Tässä työssä komponenttien käytettävyydestä A_i käytetään raja-arvoista käytettävyyttä (engl. limit availability). Raja-arvoinen käytettävyys määritellään seuraavasti

$$A_i = \lim_{t \rightarrow \infty} A_i(t). \quad (3-1)$$

Yleisesti komponentin käytettävyys $A_i(t)$ määritellään ajasta t riippuvaksi hetkittäiseksi käytettävyydeksi (point availability) ja tälle ajasta riippuvalle käytettävyydelle on monia mittareita, muun muassa keskimääräinen käytettävyys jollain aikavälillä (average availability) ja raja-arvoinen keskimääräinen käytettävyys (limit average availability). (Modarres, 2006)

3.3.2 Laskenta

Tässä luvussa käydään läpi työssä tarvittavia analyttisen käytettävyysslaskennan menetelmiä huomioiden luvussa 3.3.1 esitetyt oletukset ja yksinkertaistukset. Ensin esite-

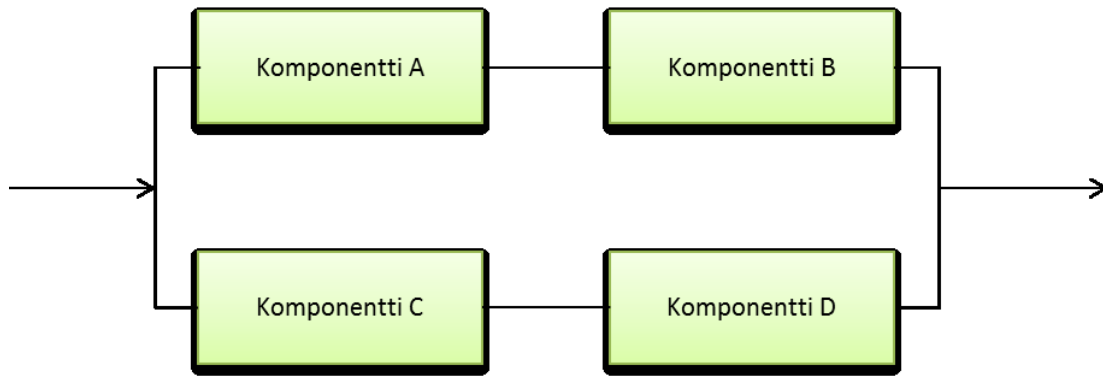
tään käytettävyysslaskennan perusteena oleva käytettävyyshlohkokaavio ja sen jälkeen käytettävyyden ja epäkäytettävyyden laskennan menetelmät. Käytettävyyden ja epäkäytettävyyden laskentaan liittyen näytetään myös miten komponenttien vikaantumis- ja korjaustaajuuksista saadaan koko järjestelmän korjaus- ja vikaantumistaajuudet.

Käytettävyyshlohkokaavio

Tässä työssä analyyttinen laskenta perustuu käytettävyyshlohkokaavioon. Kuvassa 3-5 on esimerkki käytettävyyshlohkokaaviosta. Kuvan 3-5 järjestelmä toimii kun komponentit A ja B tai C ja D toimivat. Komponentit A ja B ovat keskenään sarjaan kytkettyinä. Tällaista sarjaankytkentää kutsutaan tässä työssä komponenttisarjaksi. Komponenttisarjojen AB ja CD välillä on rinnankytkentä. Kuvan 3-5 järjestelmä ei toimi jos kumpikin rinnan kytketyistä komponenttisarjoista AB ja CD eivät toimi. Komponenttisarja AB ei toimi jos jompikumpi komponenteista A tai B ei toimi. Vastaavasti komponenttisarja CD ei toimi jos jompikumpi komponenteista C tai D ei toimi.

Seuraavaksi käydään läpi käytettävyyden ja epäkäytettävyyden tässä työssä tarvittavat laskentamenetelmät. Menetelmissä huomioidaan ainoastaan sarjaan kytketyt komponentit käytettävyyshlohkokaaviossa. Ensin näytetään kuinka käytettävyys saadaan vikaantumis- ja korjaustaajuudesta ja sarjaan kytkettyjen komponenttien yhteiskäytettävyys. Käytettävyyden laskentakaavojen jälkeen näytetään vastaavat laskentamenetelmät epäkäytettävyydelle.

Tässä työssä huomioidaan kaksi erilaista tapaa laskea käytettävyys. Ensimmäinen vaihtoehto on laskea komponenttien käytettävyydet ja näiden avulla koko järjestelmän käytettävyys. Toinen vaihtoehto on laskea vikaantumis- ja korjaustaajuudet koko järjestelmälle ja näiden avulla laskea käytettävyys koko järjestelmälle. Tässä työssä käytetään osittain molempia menetelmiä. Ensimmäinen vaihtoehto on ensisijainen, koska se pystytään laskemaan tarkasti. Toista vaihtoehtoa käytetään, koska se yksinkertaistaa laskentaa. Jokaista käytettävyyriskiä ei huomioida erikseen, vaan osaa ryhmitellä sopiviksi ryhmiksi ja ryhmille arvioidaan korjaus- ja vikaantumistaajuudet. Luvun lopussa arvioidaan vielä yläraja käytettävyyriskien ryhmityksestä aiheutuvalle virheelle.



Kuva 3-5. Käytettävyyshlokkokaavio, missä toimivuuden ehtona on, että sarjassa olevat komponentit A ja B tai C ja D toimivat.

Käytettävyys

Järjestelmän raja-arvoinen käytettävyys¹ A_J , kun tiedetään järjestelmän korjaus- ja vikaantumistaajuus (Villemeur, 1992)

$$A_J = \frac{M_J}{\Lambda_J + M_J}. \quad (3-2)$$

Vastaavasti järjestelmän raja-arvoinen käytettävyys voidaan laskea keskimääräisen korjausajan ($MTTR_J$ mean time to repair) ja vikaantumisajan ($MTTF_J$ mean time to failure) perusteella

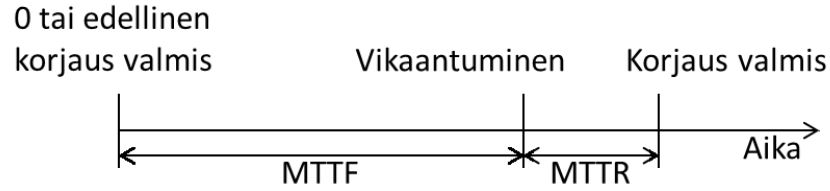
$$A_J = \frac{M_J}{\Lambda_J + M_J} = \frac{\frac{1}{MTTR_J}}{\frac{1}{MTTF_J} + \frac{1}{MTTR_J}} = \frac{MTTF_J}{MTTR_J + MTTF_J}. \quad (3-3)$$

$MTTR$ ja $MTTF$ näkyvät aikajanalla kuvassa 3-6. Järjestelmän käytettävyys voidaan laskea seuraavalla tavalla, kun n komponenttia on sarjassa ja komponenttien käytettävyydet A_i tunnetaan (Crellin, et al., 1982)

$$A_J = \prod_{i=1}^n A_i. \quad (3-4)$$

Yksittäisen komponentin käytettävyys A_i voidaan laskea vastaavalla kaavalla, kuin järjestelmän käytettävyys A_J , kun järjestelmäkohtaiset arvot korvataan komponentti-kohtaisilla arvoilla.

¹ Käytetään myös nimitystä asymptoottinen käytettävyys



Kuva 3-6. Tuotantotappion aikakäsitteet MTTF ja MTTR aikajanalla.

Epäkäytettävyys

Järjestelmän raja-arvoinen epäkäytettävyys \bar{A}_J (Villemeur, 1992), kun tiedetään systeemin korjaus- ja vikaantumistaajuus

$$\bar{A}_J = \frac{\Lambda_J}{\Lambda_J + M_J}. \quad (3-5)$$

Vastaavasti järjestelmän raja-arvoinen epäkäytettävyys voidaan laskea keskimääräisen korjausajan ($MTTR_J$ mean time to repair) ja vikaantumisaika ($MTTF_J$ mean time to failure) perusteella

$$\bar{A}_J = \frac{\Lambda_J}{\Lambda_J + M_J} = \frac{\frac{1}{MTTF_J}}{\frac{1}{MTTF_J} + \frac{1}{MTTR_J}} = \frac{MTTR_J}{MTTR_J + MTTF_J}. \quad (3-6)$$

Vertaamalla käytettävyyden ja epäkäytettävyyden laskentakaavoja (3-3) ja (3-5) voidaan havaita seuraava yhteys käytettävyyden ja epäkäytettävyyden välillä

$$\bar{A}_J = \frac{\Lambda_J}{\Lambda_J + M_J} = 1 - \frac{M_J}{\Lambda_J + M_J} = 1 - A_J. \quad (3-7)$$

Yksittäisen komponentin epäkäytettävyys \bar{A}_i voidaan laskea samalla kaavalla kuin järjestelmän epäkäytettävyys \bar{A}_J , kun järjestelmäkohtaiset arvot korvataan komponenttikohtaisilla arvoilla.

Vikaantumistaajuus

Järjestelmän vikaantumistaajuus, kun n komponenttia sarjassa $\Lambda_{J,S}$ (Villemeur, 1992)

$$\Lambda_{J,S} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (3-8)$$

missä λ_i on yksittäisen komponentin vikaantumistaajuus.

Korjaustaajuus

Järjestelmän korjaustaajuus, kun n komponenttia on sarjaan kytkettyinä $M_{J,S}$ (Villemeur, 1992)

$$M_{J,S} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}. \quad (3-9)$$

Yhtälö (3-9) ei ole tarkka. Kahden sarjaankytketyn komponentin tapauksessa tarkka korjaustaajuuden yhtälö on muotoa (Villemeur, 1992)

$$M_{J,S} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2}}. \quad (3-10)$$

Yhtälö (3-9) yksinkertaistuu, jos oletetaan korjausajat yhtä suuriksi $\mu = \mu_i \forall i$

$$M_{J,S} = \mu. \quad (3-11)$$

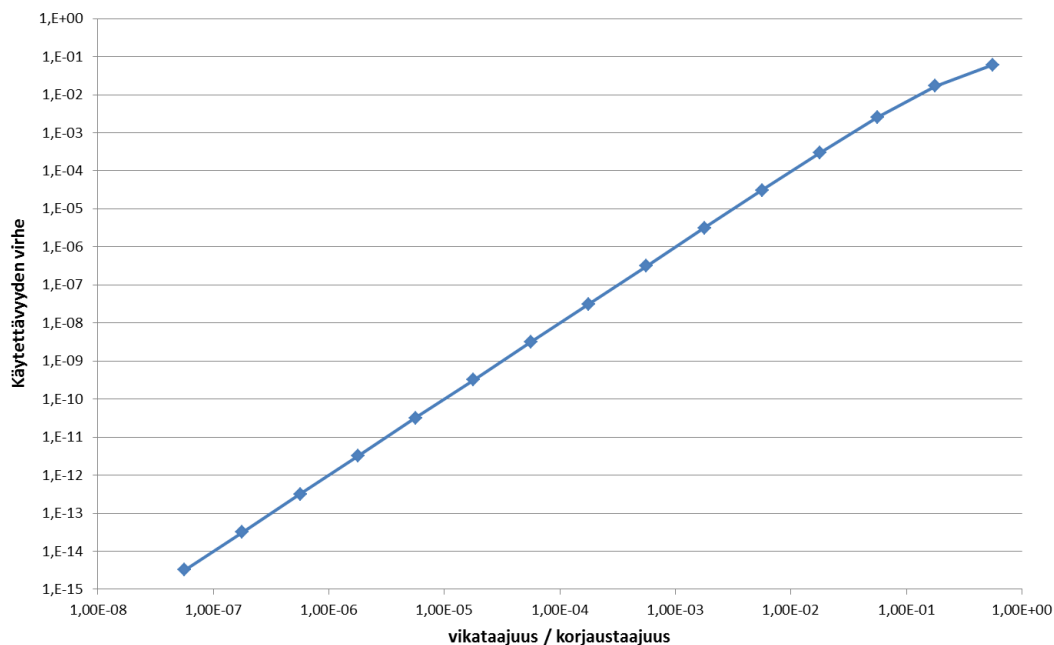
Approksimaatioiden virhe

Tässä arvioidaan yläraja virheen suuruudelle, kun käytettävyyssriskejä yhdistetään ryhmiin ja ryhmille arvioidaan vikaantumis- ja korjaustaajuudet. Arviossa huomioidaan kaksi sarjaan kytkettyä komponenttia A ja B. Käytettävyyssriskejä yhdistetään huomattavasti enemmän kuin vain kaksi kappaletta, joten yläraja virheelle saadaan kertomalla kahden käytettävyyssriskin yhdistämisestä aiheutuva virhe käytettävyyssriskien lukumäärällä. Analyttisen laskennan käytettävyyssriskejä on noin 10 000.

Kahden komponentin virheen arviossa molemmat komponentit ovat identtisiä. Molempien korjaustaajuus on 1 yksikköä. Kokonaiskäytettävyyden virhe vikataajuuden funktiona näkyy kuvassa 3-7. Tässä tapauksessa, kun korjaustaajuus on 1, vikataajuus vastaa muuttujaa vikataajuus / korjaustaajuus. Kokonaiskäytettävyys lasketaan tarkkana arvona yhtälöllä (3-4) ja komponenttien käytettävyydet yhtälöllä (3-2). Tarkasti saman tuloksen saa myös ensin laskemalla järjestelmän vikaantumis- ja korjaustaajuuden yhtälöillä (3-8) ja (3-10) ja sen jälkeen koko järjestelmän käytettävyyden yhtälöllä (3-2). Useamman komponentin sarjaan kytkennässä on hankala käyttää yhtälöä (3-10), joten myös tässä käytetään sen sijasta approksimaatiota yhtälössä (3-11). Käytettävyys välivaiheineen löytyy taulukosta L3-1 liitteestä 3.

Kuvaajan 3-7 perusteella voidaan arvioida yläraja käytettävyyssriskien yhdistämisessä syntyvälle virheelle. Suurin epäkäytettävyys suurten riskien yhdistämisestä on $1,14 \cdot 10^{-2}$ (palo huonetyypissä S), katso liite 2. Tämän suuren riskin vikaantumistaajuus on $6,34 \cdot 10^{-3}$ 1/vuosi ja korjausaika 1,817 vuotta. Huonetyyppi koostuu 12 huoneesta. Yhtä huonetta kohden syttymistaajuus on $6,34 \cdot 10^{-3} / 12 = 5,28 \cdot 10^{-4}$ 1/vuosi. Näin yhdessä huoneessa vikataajuuden ja korjaustaajuuden suhde on $5,28 \cdot 10^{-4} \cdot 1,817 = 9,60 \cdot 10^{-4}$. Kuvan 3-7 kuvaajan perusteella kahden tällaisen käytettävyyssriskin yhdistämisessä tapahtuu suuruusluokkaa 10^{-6} virhe. Kun yhdistetään suuruusluokkaa

10 000 tällaista käytettävyydevirhettä, niin yläraja käytettävyydevirheelle on 0,01, joka vastaa 1 % käyttökertoimesta. Arvion mukaan suurten käytettävyyseriskien vikaantumistaajuus ja korjausaika sisältävät merkittävämmän epävarmuuden.



Kuva 3-7. Käytettävyyden virhe kahden identtisen komponentin sarjaankytkennässä, kun käytettävyys lasketaan sarjaankytkennän korjaus- ja vikaantumistaajuuksien kautta ja korjaustaajuus lasketaan yhtälöllä (3-11) Muuttujana on vikataajuus / korjaustaajuus.

Luku 4

Menetelmät

Loviisan ydinvoimalaitoksen ensimmäisen yksikön (Lo1) käytettävyyssanalyysi koostuu kahdesta erillisestä osa-alueesta: malli sisältäen yleiset tuotantotappioiden syyt (yleismalli) ja malli pitkiä korjausaikoja vaativista vikaantumisista (suurten riskien malli). Nämä erilliset mallit yhdistetään yhdeksi käytettävyyssmalliksi. Yleismallin aineisto kerätään pääasiassa Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöhistoriasta ja mallinnus tehdään Miriam RAM Studio -ohjelmiston versiolla 1.01. Suurten riskien malli perustuu Loviisan ydinvoimalaitoksen todennäköisyyspohjaisen riskianalyysin alkutapahtumiin ja aineisto on pääasiassa PRA:n pääraportista (Jänkälä, et al., 2014b) ja asiantuntija-arvioista. Asiantuntija-arviot löytyvät liitteestä 2. Suurten riskien käytettävyyssanalyysi toteutetaan ilman erillistä käytettävyyssanalyysiohjelmistoa ja tulokset lasketaan analyttisesti käyttäen luvussa 3 esitettyä analyttisen käytettävyysslaskennan menetelmiä.

Yleismalli sisältää kaikki tavanomaiset tuotantotappioiden syyt niin, että se yksinään kuvaa tavanomaisen vuoden käytettävyyttä Loviisan ydinvoimalaitoksella. Toisin sanoen yleismalli antaa tulokseksi tavanomaisen tuotantovuoden käyttökertoimen, jota verrataan sekä historiasta saatavaan käyttökertoimeen että tavanomaisen vuoden tuotantoennusteeseen Lo1:llä. Yhdessä yleismalli ja suurten riskien malli kuvaavat pitkän aikavälin keskimääräistä käytettävyyttä Loviisa 1 ydinvoimalaitosyksiköllä.

Seuraavissa luvuissa esitellään yleismallissa, suurten riskien mallissa ja näiden yhdistämisessä käytettävät menetelmät sisältäen käytetyn aineiston esittelyn, aineistoanalyysin ja mallinnuksen menetelmät.

4.1 Yleismalli

Yleismallissa mallinnetaan Lo1:n tavanomaiset tuotantotappioiden syyt, näiden osuus kokonaisepäkäytettävyydestä ja ennustetaan tavanomaisen käyttövuoden käyttökerroin. Syyskuuhun 2015 mennessä käyttöhistoriaa on kertynyt Loviisan ydinvoimalai-

tosyksiköille yhteensä yli 70 vuotta (Fortum Oyj, 2015). Loviisan ydinvoimalaitoksen pitkän historian takia tuotantotappiot yleismalliin kerätään Loviisan ydinvoimalaitoksen historiasta. Pääsääntöisesti tuotantotappioissa huomioidaan kaikki merkityt poikkeamat bruttotuotantotehosta sekä suunnitellut että suunnittelemattomat. Omakäyttötehoa ei huomioida ja tuotantotappioiden arvioidaan laskevan nettotuotantotehoa samassa suhteessa kuin bruttotuotantoteho alenee.

Yleismallissa tuotantotappiot jaetaan kahteen ryhmään: vuosihuollon aikaiset tuotantotappiot ja tehoajonaikaiset tuotantotappiot. Vuosihuollonaikaisilla tuotantotappiolla tarkoitetaan lähinnä vuosihuollon kestoa, mitä pidempi vuosihuolto niin sitä pidempään ei ole tuotantoa. Seuraavaksi esitellään kuinka vuosihuollon ja tehoajon tuotantotappiot huomioidaan.

4.1.1 Vuosihuolto

Vuosittainen huolto- ja polttoaineenvaihtoseisokki (vuosihuolto) huomioidaan vakio-pituuisena 20,001 päivää. Seisokin pituus määritetään PRA:ssa käytettyjen Loviisan ydinvoimalaitoksen vakiotilojen mukaan. Viimeisimmät, vuonna 2014 päivitetty, vakiotilojen kestot löytyvät PRA:n pääraportista (Jänkälä, et al., 2014b). Seisokin pituudessa huomioidaan vakiotilat B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O ja Q. Loppu-aika vuodesta eli vakiotilat A ja P huomioidaan tehoajona. Siirryttäessä vakiotilasta toiseen jonkin turvallisuusjärjestelmän varmistusaste tai onnistumiskriteeri muuttuu. Osa vakiotiloista määritellään turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa (TTKE) ja osa on PRA:n yhteydessä määritettyjä. Vakiotilojen kestoissa huomioidaan vuosihuoltoseisokit vuosilta 2006 - 2013 sekä Lo1:lta että Lo2:lta. Vakiotilojen kestoissa huomioidaan vastaavat vakiotilat myös neljä- ja kahdeksanvuotisvuosihuolloista. Näissä pidemmissä vuosihuolloissa on kuitenkin omia vakiotiloja joita ei huomioida ja joiden pituus vastaa lähes kokonaan vuosihuollon pidentymisestä. Vuosihuollon pituus vastaa siis keskimääräistä vuosihuollon pituutta polttoaineenvaihtoseisokissa ja lyhyessä vuosihuollossa. Vakiotilan A lopussa sähköteho alennetaan gradientilla noin 60 MW/h ja turpiinit kytketään irti verkosta. Vakiotila Q päättyy, kun generaattori on verkossa.

Vuonna 2015 Loviisan ydinvoimalaitoksella on neljä eri tyyppistä vuosihuoltoa: polttoaineenvaihtoseisokki, lyhyt vuosihuolto, nelivuotisvuosihuolto ja kahdeksanvuotisvuosihuolto. Parillisina vuosina toteutetaan yhdellä yksiköllä lyhyt vuosihuolto ja toisella neli- tai kahdeksanvuotisvuosihuolto. Vuosihuollot ajoittuvat elokuun alun ja lokakuun puolen välin väliseen aikajaksoon. Parittomina vuosina toteutetaan kummallakin yksiköllä polttoaineenvaihtoseisokit. Silloin vuosihuollot ajoittuvat elokuun

puolesta välistä syyskuun lopun väliseen ajanjaksoon. Vuosihuoltotyyppien arvioidut kestot:

- Polttoaineenvaihtoseisokki noin 15 – 16 vuorokautta.
- Lyhyt vuosihuolto noin 18 – 24 vuorokautta.
- Nelivuotisvuosihuolto noin 30 vuorokautta
- Kahdeksanvuotisvuosihuolto noin 38–40 vuorokautta

(Vonka, 2007)

Vuosihuoltostrategian mukainen vuosihuollon pituus ilman neli- ja kahdeksanvuotisvuosihuoltoa on $\frac{15+16+18+24}{4} = 18,25$ päivää. Työssä käytettävä seisokin pituus 20,001 päivää on siis hieman suurempi kuin vuosihuoltostrategiassa (Vonka, 2007) arvioitujen polttoaineenvaihtoseisokin ja lyhyen vuosihuollon keskimääräinen pituus. Huomioiden kaikki vuosihuoltotyypit seisokin pituudeksi saadaan vuosihuoltostrategian mukaisesti $0,5 \frac{15+16}{2} + 0,25 \frac{18+24}{2} + 0,125 \cdot 30 + 0,125 \frac{38+40}{2} = 21,625$ päivää.

Vuosihuollon pituuden mallinnus on myös mahdollista ja esimerkiksi vuosittain vuosihuollon pituus ennustetaan ja se huomioidaan vuosittaisessa tuotantoennusteessa (Lahti, 2014). Vuosihuollon venymisen syyt listataan ja arvioidaan vuosittain Loviisan ydinvoimalaitoksella vuodesta 2009 lähtien (Leino, 2010). IAEA:n mukaan (IAEA, 2015b) viimeisen viiden vuoden aikana Lo1:n suunnittelemattomista tuotantotappiosta yli puolet johtui suunniteltujen seisokkien venymisestä, joten tarkan mallinnuksen kannalta olisi tärkeää huomioida myös seisokin aikaiset tuotantotappiot.

4.1.2 Vuosihuollon ulkopuoliset tuotantotappiot

Vuosihuollon ulkopuoliset tuotantotappiot mallinnetaan Loviisan ydinvoimalaitoksen laitoshistorian perusteella. Lo1 yksikön malli rakennetaan Miriam RAM Studio -ohjelmaan Loviisan ydinvoimalaitoksen yleiskuvauksen (Pirinen, 2010) perusteella. Laitoshistorian tuotantotappiotiedot sovitetaan Miriam RAM Studioon tehdyn mallin mukaisiksi ja historiatiedot analysoidaan PREB menetelmällä (Jänkälä, et al., 2014b), (Vaurio & Jänkälä, 2006).

Aineisto

Edellytys laitoshistorian käyttämiselle on, että historia on hyvin tiedossa. Tästä syystä Lo2 historiasta ei huomioida vuosia 1980 - 1986. Dokumentointiin on tullut muutoksia vuosien mittaan ja voimalaitoksen alkuaikojen historian tarkka läpikäyminen vaatisi paljon aikaa suhteessa saatavaan hyötyyn. Lisäksi käytetty historia ei saa poiketa nykytilanteesta merkittävästi. Tästä syystä Lo1 historiasta ei huomioida vuosia 1977 -

1980. Näinä vuosina Lo1 käyttökerroin oli merkittävästi pienempi, kuin myöhempiä vuosina.

Koko käyttöhistorian ajalta kerätään ainoastaan tuotantotappiot, joista aiheutuu koko ydinvoimalaitosyksikön Lo1 tai Lo2 alasajo. Tämä johtuu osittain yllämainituista syistä sekä siitä että pienemmät tuotantotappiot arvioidaan vähemmän merkitykselliseksi. Muut kuin koko voimalaitoksen alasajon aiheuttaneet tuotantotappiot kerätään Lo1:ltä 1991 - 2013 ja Lo2:lta 2002 - 2013. Kaikki suunnitellut tuotantotappiot kerätään ja huomioidaan vain aikavälillä 2002 - 2013 molemmilla Loviisan ydinvoimalaitosyksiköillä. Vuodesta 2002 eteenpäin suunnitellut tuotantotappiot löytyy selkeämmin ja helpommin. Lisäksi suunnitellut tuotantotappiot eivät vaihtelee vuosittain yhtä voimakkaasti kuin muut tuotantotappiot, joten niiden luotettavaan mallinnukseen riittää suppeampi aineisto.

Vaihtoehto laitoshistorialle on yleisdata muilta ydinvoimalaitoksilta. On mahdollista käyttää myös konventionaalisten lauhdevoimalaitosten, vastapainevoimalaitosten sekä myös muun komponenttien vikaantumisia dokumentoivan teollisuuden vikaantumistietoja. Ydinvoimalaitosten yleisdataa löytyy esimerkiksi IAEA:n PRIS ja IRS palveluista (IAEA, 2015b), (IAEA, 2015c). Konventionaalisten lauhdevoimalaitosten sekä vastapainevoimalaitosten käyttöhistoriaa löytyy esimerkiksi EPRI:n maksullisesta palvelusta (EPRI, 2015). Pumppujen, venttiilien ja muiden voimalaitoksella käytettävien laitteiden vikaantumistietoja löytyy myös monesta muusta lähteestä. Käyttöhistoriadan lähteitä löytyy listattuna ja arvioituna esimerkiksi seuraavista lähteistä (Cadwallader, 2012) ja (Villemeur, 1992). Loviisan oma laitoshistoria arvioidaan kuitenkin sopivimmaksi Lo1:n käytettävyyksmallinnukseen.

Pitkän laitoshistorian sekä hyvän dokumentoinnin takia Loviisan ydinvoimalaitoksen laitoshistorian arvioidaan kuvaavan paremmin Loviisan ydinvoimalaitoksen omaa käytettävyyttä. Lisäksi Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttökerroin on merkittävästi suurempi kuin ydinvoimalaitoksissa keskimäärin. Loviisan ydinvoimalaitoksen koko käyttöhistorian keskimääräinen käyttökerroin 87,2 % ja 92,1 % vuonna 2013. Ydinvoimalaitosten keskimääräinen käyttökerroin vuonna 2013 oli 72,6 % (IAEA, 2015a).

Loviisan ydinvoimalaitoksen historia on pääosin hyvin dokumentoitu ja kattava. Dokumentointi on hyvää lähes koko käyttöhistorian ajalta, mutta raportointitavat ovat hieman muuttuneet vuosien saatossa ja lähivuosien aineisto on helpommin saatavilla. Loviisan ydinvoimalaitoksen merkittävistä tapahtumista löytyy erillisiä raportteja ja kuukausittain ja vuosittain on lisäksi erilaisia koontiraportteja. Tässä työssä käytetään erityisesti käyttöyksikön vuosikertomuksia, esimerkiksi raportti (Mättölä, 2013), jois-

ta löytyy käyttöhistoriakäyrät, merkittävimmät tuotantotappioiden syyt, korjausajat ja tuotantotappioiden määrät. Lisäksi korjaus- ja muutostyöt on dokumentoitu. Merkittävimmät ja lisätutkimuksiin johtaneet tapahtumat on raportoitu erillisraportteihin, kuten käyttötapahtumaraportit, häiriökertomukset, erikoisraportit, reaktorin ja turbiinin pikasulkuraportit.

Aineistoanalyysi

Aineistoanalyysi alkaa tuotantotappioiden tietojen keruulla aineistosta. Tietojenkeräystavasta ja analyysistä riippuu kuinka mallinnus voidaan toteuttaa. Lisäksi keräystapaan vaikuttaa komponenttien tyyppi (Villemeur, 1992). Aineistoanalyysin tulokset kaikille huomioiduille tuotantotappioille löytyy liitteestä 2.

Tuotantotappiotietojen kerääminen

Yleisesti komponenttien vikaantumistietoja voidaan kerätä kahdella eri tavalla: testauksilla ja käyttökokemuksella (Villemeur, 1992). Tässä työssä mallinnuskohteena on koko Lo1:n toiminta, joten työn laajuuteen ei sovi kaikkien yksittäisten voimalaitoksen toimintaan vaikuttavien komponenttien vikaantumistietojen keräys. Sopivaksi laajuudeksi valitaan kaikki vikaantumiset, jotka aiheuttavat suoraan tuotantotappioita. Tiedot tällaisista vikaantumisista on helposti saatavissa käyttöhistoriasta. Nämä vikaantumiset näkyvät tehonalennuksina käyttöhistoriassa. Tällaiset vikaantumiset saattavat olla peräisin sekä testauksessa havaituista vioista että käytössä olevien laitteiden vikaantumisesta. Loviisan ydinvoimalaitos voidaan joutua ajamaan alas testauksessa havaitun vian takia esimerkiksi turvallisuusteknisten käyttöehtojen (TTKE) takia.

Loviisan ydinvoimalaitoksella tuotantotappiona näkyvät viat ovat usein monen yhtäaikaisen vikaantumisen summa. Esimerkiksi Lo1:llä on pääsyöttövesipumppuja viisi joista yksi on varalla valmiina otettavaksi käyttöön (Pirinen, 2010). Yhden pääsyöttövesipumpun vikaantuminen ei välttämättä näy tuotantotappiona, jos varalla oleva pumppu saadaan riittävän nopeasti käyntiin. Tällaisissa järjestelmissä vikoja ei yksilöidä tietyille pumpuille vaan koko järjestelmälle. Pääsyöttövesipumppujen tapauksessa viat kohdennetaan pääsyöttövesijärjestelmälle.

Osalla järjestelmistä jo yksikin vikaantuminen aiheuttaa tuotantotappiota. Esimerkki tällaisesta vikaantumisesta on pääkiertopumpun vikaantuminen. Pääkiertopumppuja on kuusi eikä yhtään ole varalla (Pirinen, 2010). Pääkiertopumpulle löytyy varamoottori Loviisasta, mutta moottorinvaihto vie aikaa. Tällaiset vikaantumiset yksilöidään suoraan pumpulle.

Osa Loviisan ydinvoimalaitoksen tehoajonaikaisista tuotantotappioista on suunniteltu ja kuten venytysajo ja tuorehöyryjärjestelmän (RA) varoventtiilien koestukset. Suunnitellut tuotantotappiot huomioidaan kuten muutkin tuotantotappiot. Näitä ei yksilöidä eri komponenteille, kuten eri varoventtiileille, vaan kaikki samanlaiset suunnitellut tuotantotappiot huomioidaan yhtenä tuotantotappiona. Eli esimerkiksi RA-varoventtiilien koestukset huomioidaan yksittäisenä tuotantotappiona vuosittain.

Lähde (Villemeur, 1992) luokittelee komponentit pääpiirteittäin neljään tyyppiin, joilla kaikilla on omia erityispiirteitä liittyen aineiston keräykseen: elektroniset komponentit (engl. electronic components), sähkökäyttöiset komponentit (electric components), aktiiviset sähkömekaaniset komponentit (active electromechanical components) ja passiiviset mekaaniset komponentit (passive mechanical components). Komponenttityypit eroavat toisistaan ainakin seuraavissa asioissa: kuinka niitä pystytään korjaamaan, kuinka niiden toimivuutta pystytään mallintamaan ja kuinka niiden toimivuutta pystyy ja kannattaa testata.

Tässä työssä vikaantumistiedot kerätään käyttöhistoriasta eikä siinä näy kaikkien yksittäisten komponenttien vikatiedot. Tästä syystä kaikki vikaantumiset käsitellään samalla tavalla. Kaikista tuotantotappiosta kerätään tapahtumapäivämäärä, korjausaika ja tehonalennus. Tuotantotappioiden alasajo- ja ylösajonopeudesta tai alasajon ja ylösajon kestoista ei kerätä tietoa. Korjausaika Δt lasketaan tehonalennus P_{Loss} ja tuotantotappiomäärän perusteella E_{Loss} . Tällöin laskennallinen tuotantotappio vastaa ilmoitettua tuotantotappiota. Tarvittaessa korjausaika otetaan myös erilaisista raporteista. Korjausaika lasketaan yhtälöllä

$$\Delta t = \frac{E_{Loss}}{P_{Loss}}, \quad (4-1)$$

missä tehonalennus arvioidaan käyttöhistorian tai voimalaitoksen yleiskuvauksen (Pirinen, 2010) perusteella. Voimalaitoksen tietojen perusteella arvioidaan esimerkiksi että toisen turpiinin pikasulku aiheuttaa 50 % tuotantotappion mikä tarkoittaa nykyisellä 520 MW nimellisteholla 260 MW tehonalennusta. Nimellistehot Loviisan voimalaitoksella ovat vuosien saatossa kasvaneet mikä pitää huomioida. Osa tuotantotappioista kestää useamman päivän, jolloin tuotannon alenema näkyy suoraan käyttöhistoriakäyrällä. Tuotantotappiomäärät löytyvät osalle tapahtumista erilaisista raporteista, mutta osalle tuotantotappio arvioidaan käyttöhistoriakäyrältä. Käyttöhistoriakäyrällä on päivittäiset keskimääräiset tuotantotehot, jolloin tuotantotappiomäärä saadaan pinta-alana käyttöhistoriakäyrältä. Tapahtumapäivämäärä näkyy käyttöhistoriassa.

Tuotantotappiot kerätään sekä Lo1:ltä että Lo2:lta, vaikka mallinnus koskee vain Lo1:tä. Lo2:n arvioidaan vastaavan huomattavasti paremmin Lo1:tä, kuin muut PWR voimalaitokset maailmalla. Lisäksi Lo2:n aineisto on yhtä helposti saatavilla kuin Lo1:n aineisto. Aineistanalyysissä otetaan huomioon että Lo2:n tuotantotappiot eivät ole Lo1:n tuotantotappiota.

Tuotantotappiotietojen analysointi

Kaikki vuosihuollon ulkopuoliset tuotantotappiot analysoidaan PREB (Parametric robust empirical Bayes) menetelmällä. Menetelmän tulokset syötetään Miriam RAM Studio -ohjelmistoon rakennettuun Lo1:stä kuvaavaan malliin.

PREB menetelmässä tulokseksi saadaan vikaantumis- ja korjaustaajuuden jakaumaestimaatit. Ensin laskentaohjelmassa arvioidaan onko vikaantumistaajuudessa trendiä. Jakaumaestimaatit ovat gammajakaumia. Trendi testataan vain, jos tuotantotappioita on neljä tai enemmän samassa ryhmässä. PREB menetelmää varten riittävän samantyyppiset tuotantotappiot arvioidaan ryhmänä. Esimerkiksi vastaavat järjestelmät Lo1:llä ja Lo2:lla ryhmitellään samaan ryhmään. Yksiköiden sisällä esimerkiksi saman järjestelmän pumput, kuten pääkiertopumput, ryhmitellään samaan ryhmään. Ryhmän sisällä eri tuotantotappioiden jakaumien parametrien oletetaan olevan peräisin samasta jakaumasta. Pääkiertopumppujen tapauksessa Lo1:n sekä Lo2:n pääkiertopumppujen oletetaan eroavan yhtä paljon toisistaan ja vikaantuminen yhdessä pumputta vaikuttaa yhtä paljon kaikkien muiden pumppujen vikaantumis- ja korjaustaajuuteen. Näin myös Lo2:n tuotantotappiot vaikuttavat Lo1:n tuotantotappioihin. Laskentaohjelman havaitessa trendin, kaikille ryhmän tuotantotappiolle arvioidaan yksi yhteinen vikaantumis- ja korjausaika. Menetelmän käyttöä Loviisan ydinvoimalaitoksella esitetään PRA:n pääraportissa (Jänkälä, et al., 2014b) ja konferenssijulkaisussa (Jänkälä & Vaurio, 1987). Laskenta trendianalyysillä esitetään konferenssijulkaisussa (Jänkälä & Vaurio, 1989). Lisätietoja bayesilaisesta mallinnuksesta löytyy esimerkiksi kirjasta (Gelman, et al., 2014).

PREB menetelmä on suunniteltu erityisesti PRA:n tarpeisiin. Jänkälä ja Vaurio vertailivat PREB menetelmää vuonna 2006 (Vaurio & Jänkälä, 2006). Vertailussa todettiin menetelmän antavan hyvät arviot vikaantumistaajuudelle erityisesti ongelmassa, joissa oli vähän tai ei yhtään tapahtumaa ja komponentit arvioitiin identtisiksi. Tässä työssä tuotantotappioiden ryhmät vastaavat identtisten komponenttien ryhmiä ja Loviisan ydinvoimalaitoksen hyvä käytettävyys aiheuttaa sen, että yksittäisiä tuotantotappioita on sattunut voimalaitoksella vähän. Myös Villemeuer arvioi bayesilaisen analyysin hyväksi menetelmäksi analysoida vikaantumis- ja korjausaikajakaumia (Villemeuer, 1992). PREB menetelmän lisäksi olisi kuitenkin hyvä käydä kaikki jakaumat läpi ja

arvioida tuloksen mielekkyyttä erilaisilla tilastollisilla menetelmillä. Tällaisesta tarkastelusta ei arvioitu saatavan riittävästi hyötyä työmäärään nähden.

Aineistoanalyysin tulokset kaikille huomioiduille tuotantotappioille löytyy liitteestä 2.

4.1.3 Mallinnus

Lo1:n malli rakennetaan Miriam RAM Studio -ohjelmistoon aineistoanalyysin ja Lo-viisan ydinvoimalaitoksen yleiskuvauksen (Pirinen, 2010) perusteella. Tarvittaessa mallinrakennukseen haetaan myös yksityiskohtaisempia tietoja Lo1:n järjestelmästä. Miriam RAM Studioon rakennetun mallin käytettävyyshlohkokaaviot löytyvät liitteestä 1 ja vikaantumistiedot liitteestä 2.

Malli rakennetaan vastaamaan Lo1:tä 1.1.2015. Simulointi aloitetaan tästä ja simuloidaan Lo1 loppukäyttöikää. Raportin (Sipola & Nuutinen, 2014) mukaan Lo1 käyttöikä loppuu 31.12.2027 valtioneuvoston päätöksellä 26.7.2007 Dnro 6/330/2006. Miriam RAM Studioon kyse on simulaatiosta, joten simulaatiota toistetaan riittävän monta kertaa, että simulaation tulosten keskiarvolle saadaan riittävä tarkkuus. Jokainen simulaatio aloitetaan lisäksi jonkin verran ennen 1.1.2015. Tämän ajan simulaatiotuloksia ei huomioida tuloksissa. Ylimääräisen alkupään simuloinnin ansiosta asetettu alkutila ei vaikuta lopputulokseen. Hyvä lähdemateriaali simulointiin on esimerkiksi (Gelman, et al., 2014).

Vuosihuollon ulkopuoliset tuotantotappiot mallinnetaan kaikki erikseen. Nämä ovat hyvin dokumentoituja ja ne ovat helppoja kerätä ja mallintaa. Vuosihuolto mallinnetaan vakiopituisena 20,001 päivää, kuten jo aineiston yhteydessä mainitaan. Myös vuosihuollon aikaiset tuotantotappiot olisi hyvä mallintaa erikseen, mutta niiden arvioiminen ei mahdu tähän työhön.

Miriam RAM Studio tarjoaa laajat mahdollisuudet erilaisille mallinnusvaihtoehdoille (Miriam, 2015). Käytettävyyssmallissa ei esimerkiksi huomioida seuraavia Miriam RAM Studion ominaisuuksia: kustannuksia ja tuotantotappioiden käyttäytymistä eri vuosina tulevaisuudessa tai eri aikoina vuodesta. Molemmat näistä ominaisuuksista tuovat esiin Miriam RAM Studion hyviä puolia ja ovat potentiaalisia mallin kehityskohtia.

Seuraavaksi luetellaan mallinnuksen oletukset tuotantotappiosta. Myös oletukset tuotantotappioista ovat pääsääntöisesti yksinkertaisia ja mallia tarkennettaessa näitä on mahdollista muuttaa paremmin voimalaitoksen toimintaa kuvaaviksi. Ensin luetellaan pääsäännöt ja sen jälkeen poikkeukset pääsäännöistä. Tässä komponentilla tarkoitetaan tuotantotappiota, joka ei ole realisoitunut. Pääsäännöt:

- Vikaantumis- ja korjausajat oletetaan eksponentiaalisesti jakautuneiksi.
- Vikaantumis- ja korjausajan jakaumien odotusarvot oletetaan käänteisarvoiksi PREB menetelmän gammajakaumaestimaattien odotusarvoista.
- Komponentit toimivat simulaation alussa.
- Komponentteja päästään korjaamaan välittömästi vian ilmettyä.
- Missään huollossa ei huomioida varaosatilannetta.
- Komponentit lopettavat toimintansa välittömästi kun ne vikaantuvat ja saadaan takaisin tuotantoon vasta kun korjaus on valmis.
- Korjaus onnistuu aina.
- Ainoastaan vikaantuneet komponentit korjataan.
- Komponentit vikaantuvat ainoastaan käytössä.
- Komponentit käynnistyvät aina välittömästi kun komponentille on tarvetta.

Poikkeukset pääsäännöstä, tuotantotappion mallinnusnimi suluissa lyhyen selityksen perässä:

- Vikaantumisajan jakauma oletetaan vakioksi seuraavissa suunnitelluissa tuotantotappioissa: RA-varoventtiilien vuosikoestus (RAkoest), venytysajo (venyt) ja vuosihuolto (vuosihuolto). Näiden tiedetään tapahtuvan joka vuosi suurin piirtein samaan aikaan.
- Tuotantotappioiden arvioidaan voivan realisoitua milloin tahansa riippumatta mitkä järjestelmät ovat käytössä voimalaitoksella seuraavissa suunnitelluissa tuotantotappioissa: RA-varoventtiilien vuosikoestus (RAkoest), venytysajo (venyt) ja vuosihuolto (vuosihuolto). Näiden tiedetään tapahtuvan joka vuosi suurin piirtein samaan aikaan.
- Korjausajan jakauma oletetaan vakioksi vuosihuollossa (vuosihuolto). Vuosihuollon pituuden jakaumaa ei ole arvioitu.

Mallinnusteknisistä syistä myös vuosihuolto ja suunnitellut koestukset kuten RA-varoventtiilien koestukset huomioidaan vikoina. Jos kyseiset viat huomioidaan suunniteltuina määräaikaishuoltoina (engl. planned maintenance), näiden epäkäytettävyyden vaikutus ei näy Miriam RAM Studio:n ilmoittamassa käytettävyydessä. Huomioimalla kaikki tuotantotappiot vikoina Miriam RAM Studio:n ilmoittama käytettävyyden ”production availability” vastaa luvussa 3.1.2 määritettyä käytettävyyden mittaria ”load factor”.

4.2 Suurten riskien malli

Suurten riskien mallissa arvioidaan pitkiä seisokkeja aiheuttavia käytettävyyssriskejä Loviisan ydinvoimalaitoksella. Arvioinnin kohteena on Lo1 yksikkö. Tässä työssä suurten riskien mallinnus rajataan Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n alkutapahtumiin. Työ tehdään PRA ryhmään, joten PRA:n alkutapahtumiin löytyy PRA ryhmästä paljon asiantuntemusta. Kertyneen asiantuntemuksen lisäksi näille riskeille on paljon kirjallisia lähteitä sekä Loviisan ydinvoimalaitoksella että muilla ydinvoimalaitoksilla. Suurten riskien mallin yhteydessä saadaan myös havaintoja, kuinka hyvin PRA ja käytettävyyssanalyysi tukevat toisiaan.

Tehoajolla kaikki PRA:n alkutapahtumat aiheuttavat vähintään toisen ydinvoimalaitosyksikön pikasulun (Jänkälä, et al., 2014b), joten suurten riskien mallissa ei huomioida osittaisia tehonalennuksia. Alkutapahtumien käytettävyyssvaikutukset mallinnetaan Microsoft Excel:ssä käyttäen luvussa 3.3.2 esitettyjä analyyttisen käytettävyysslaskennan menetelmiä. Alkutapahtumille arvioidaan vikaantumis- ja korjausajat ja näistä saadaan yksittäisen alkutapahtuman käytettävyys. Kaikkien alkutapahtumien yhteiskäytettävyys on suurten riskien mallin käytettävyys.

Loviisan PRA-mallissa alkutapahtumataajuuksia on yli 10 000 (Jänkälä, et al., 2014b), joten ei ole järkevää analysoida jokaista alkutapahtumataajuutta erikseen. Alkutapahtumat ryhmitellään sopiviin ryhmiin ja nämä ryhmät analysoidaan erikseen. Alkutapahtumataajuuksia ei oteta sellaisenaan PRA-mallista, vaan niiden soveltuvuutta käytettävyyssanalyysiin arvioidaan ja taajuutta kasvatetaan tai pienennetään tarvittaessa. Tarvittavat tiedot alkutapahtumista kerätään PRA:n pääraportista (Jänkälä, et al., 2014b). Lisäksi käytetään asiantuntija-arvioita, laitoshistoriaa Loviisan ydinvoimalaitokselta sekä muilta ydinvoimalaitoksilta. Lisätietoja PRA-mallista saadaan myös Loviisan ykkösyksikön riskimallista PSA14, johon on mallinnettu laitosyksikön vuoden 2014 vuosihuollon jälkeinen konfiguraatio.

Seuraavaksi tässä luvussa esitellään suurten riskien mallinnuksen lähdemateriaali, lähdemateriaalin analysointimenetelmät ja lopuksi esitetään mallinnusmenetelmät.

4.2.1 Lähdemateriaali

Lähdemateriaalina suurille riskeille on ydinvoimalaitosten historia sekä asiantuntija-arviot. Muiden ydinvoimalaitosten osalta lähdemateriaalina eritellään ainoastaan lähteet joita tässä työssä käytetään. Loviisan ydinvoimalaitoksen materiaalissa on käytetty tietoja myös muilta ydinvoimalaitoksilta, mutta näitä lähteitä ei eritellä tässä työssä.

Loviisan ydinvoimalaitos

Suurten riskien mallin lähtökohtana on Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n alkutapahtumat. Ajantasaisimmat tiedot näistä löytyy viimeisimmästä PRA:n pääraportista vuodelta 2014 (Jänkälä, et al., 2014b). Osaan alkutapahtumista lisätietoja kerätään myös pääraportin lähteistä sekä Loviisan ydinvoimalaitoksen riskimallista PSA14, joka on mallinnettu RiskSpectrum-ohjelmistolla. PSA14 malli kuvaa Lo1:tä vuoden 2014 vuosihuollon jälkeisellä konfiguraatiolla. PSA14 mallista saadut alkutapahtumataajuudet sekä tiedot mistä tapahtumasta on kyse löytyvät liitteestä 2. Tarvittaessa käytetään myös Loviisan ydinvoimalaitoksen omaa laitoshistoriaa, kuten yleismallissa.

Alkutapahtumien harvinaisuus vaihtelee voimakkaasti Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:ssa. Osassa alkutapahtumia riittää Loviisan oma laitoshistoria arvioitaessa alkutapahtumataajuutta. Osa alkutapahtumista ei ole tapahtunut vielä yhdessäkään ydinvoimalaitoksessa. Suurin osa alkutapahtumista on tapahtumien lukumäärässä tältä väliltä. (Jänkälä, et al., 2014b)

Muut ydinvoimalaitokset

Muiden ydinvoimalaitosten historiatietoja kerätään pääasiassa IAEA:n PRIS-palvelusta (Power Reactor Information System). Käytössä on myös IAEA:n IRS-palvelu (International Reporting System for operating experience). Molempiin palveluihin pääsee netin kautta web-selaimella ja ne ovat käytettävissä IAEA:n jäsenvaltioissa. IRS palvelulla on vuonna 2015 jäsenmaita yhteensä 35 ja se on tarkoitettu käytökokemuksen vaihtoon erityisesti turvallisuuden parantamiseen ydinvoimalaitoksilla. Palvelussa jaetaan turvallisuuden kannalta poikkeuksellisen merkittävien tapahtumien tapahtumaraportteja (Ahmed, et al., 2015). Palvelu on tarjolla jäsenvaltion ydinvoima-alan ammattilaisille. Palvelu on käytettävissä osoitteessa (IAEA, 2015c) rekisteröitymisen jälkeen. Suomessa oikeuksia palveluun voi anoa STUK:lta.

IAEA:n PRIS palvelu sisältää tietoja jäsenvaltioiden reaktoreista ympäri maailmaa. PRIS perustettiin vuonna 1970 mistä lähtien dataa löytyy. Monesta maasta dataa on vasta myöhemmin. Lisäksi joitain raporttityyppejä saa vasta myöhemmiltä vuosilta (IAEA, 2015b). Tietoja on reaktoreista, jotka ovat käytössä, rakenteilla tai jo suljettuja. PRIS sisältää kaikki jäsenvaltioiden ydinvoimalaitosten tuotantotappiot, jotka vastaavat suuruudeltaan vähintään kymmenen tunnin tuotantotappiota täydellä tuotantoteholla. Järjestelmä sisältää kahden tyyppistä tietoa: reaktoritietoja (engl. reactor specification data) sekä reaktorien suorituskykytietoja (performance data). Molemmista tietotyypeistä löytyy myös historiadataa. Reaktoritiedot sisältävät teknisiä sekä tunnis-

tetietoja, kuten reaktorin tila, sijainti, operaattori, omistaja, toimittaja ja merkkipäivämäärät. Suorituskykytiedot sisältävät tietoa tuotetusta energiasta (energy production), tuotantotappiosta (energy loss data), tuotannon keskeytyksistä (outage details) ja muista tuotantoon liittyvistä tapahtumista (operational event).

IAEA tuottaa PRIS tietokannasta kaksi virallista julkaisua joka vuosi: ”Nuclear power reactors in the world” ja ”Operating experience with nuclear power stations in member states”. Nämä julkaisut ovat julkisessa käytössä ja löytyvät IAEA:n nettisivuilta. PRIS palvelu ei ole pelkästään jäsenille tarkoitettu, vaan siinä on kaikille avoin osa joka löytyy osoitteesta (IAEA, 2015a). Julkisesta palvelusta löytyy tietoja PRIS palvelusta ja maailmanlaajuisista tilastitietoa ydinvoimasta. Jäsenille tarkoitettu palvelu löytyy osoitteesta (IAEA, 2015b). Myös jäsenille tarkoitettussa palvelussa on useita pääsyoikeustasoja. Ydinvoimaa operoivilla yhtiöillä, kuten Fortumilla, on pääsy korkeimpaan pääsyoikeustasoon (IAEA, 2015b).

Tässä työssä IAEA:n PRIS palvelusta on käytössä kaksi versiota (IAEA, 2015b) ja (IAEA, 2004b). Vuoden 2015 versio on uudempi, sisältää enemmän dataa ja on ominaisuuksiltaan laajempi. Vuoden 2015 versiossa on myös enemmän rajoituksia. Siinä esimerkiksi estetään tietojen saaminen yksittäisistä tuotantotappiosta. Vuoden 2004 versiossa saa eriteltyä yksittäiset tuotantotappiot ja jokaisessa tuotantotappiossa ilmoitetaan ydinvoimalaitosyksikkö. PRIS palvelun luokitukset eivät suoraan vastaa Loviisan PRA:n alkutapahtumia. PRA:n alkutapahtumien ilmenemistäajuuksissa huomioitavat tapahtumat löytyvät listattuna PRA:n pääraportista (Jänkälä, et al., 2014b). Näitä samoja tapahtumia on hyvä käyttää myös korjausajan arvioimisessa aina kun mahdollista. PRIS palvelussa tuotantotappiot luokitellaan seuraavien tietojen mukaan:

- Suunniteltu, suunnittelematon tai muu.
- Tuotantotappio aiheuttaa vain osittaisen tehonlaskun tai yksikkö ei tuota yhtään energiaa ennen, kuin tuotantotappion aiheuttanut vikaantuminen on korjattu.
- Alasajon tyyppi suunnittelemattomille tuotantotappiolle. Nopeus ja tapahtuiko automaattisesti vai manuaalisesti. Yhteensä viisi eri vaihtoehtoa.
- Suora syy tuotantotappiolle. Esimerkiksi voimalaitoksen laitteistovika tai tulipalo. Yhteensä 19 eri syytä.
- Tuotantotappion aiheuttanut järjestelmä tai komponentti. Yhteensä 126 vaihtoehtoa.

Näiden luokitusten perusteella ei pysty erottamaan yhteen alkutapahtumaan liittyviä tuotantotappioita.

Asiantuntija-arviot

Asiantuntija-arviot koskevat Loviisan ydinvoimalaitosta ja asiantuntijoina on Fortum Power and Heat Oy:n työntekijöitä. Asiantuntija-arvioissa kerätään korjausaika-arvioita PRA:n alkutapahtumille. Asiantuntija-arviot kerätään kahdella eri kerralla. Ensimmäisessä tapaamisessa PRA ryhmän jäsenet arvioita korjausaikoja ja toisessa tapaamisessa on mukana myös Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöhenkilökuntaa. PRA-ryhmän henkilökuntaa keväällä 2015: Kalle Jänkälä, Ilkka Paavola, Sami Siren, Rasmus Hotakainen, Raul Kleinberg, Mikael Biese ja Simo Sihvola. Toisessa kokouksessa Loviisan ydinvoimalaitokselta asiantuntija-arviot kerätään seuraavilta henkilöiltä: Tommi Purho, Anssi Laakso, Miikka Ritala ja Marko Leino. Kokouksissa asiantuntijat arvioivat myös mallissa tehtyjä oletuksia ja näihin tehdään tarvittaessa muutoksia.

4.2.2 Aineistoanalyysi

Suurten riskien aineistoanalyysissä arvioidaan ensin Loviisan ydinvoimalaitoksen sekä IAEA:n palveluista löytyvän muiden ydinvoimalaitosten datan sopivuutta käytettävyyssanalyysiin. Datan sopivuuden jälkeen käydään läpi menetelmät, joilla alkutapahtumataajuuksia ja korjausaikoja arvioidaan. Alkutapahtumataajuutta ja korjausaikaa täytyy arvioida, koska näitä saadaan useasta eri lähteestä ja osa lähteistä on tarkoitettu alun perin PRA:lle.

Suurten riskien vaikutusta käytettävyyteen arvioidaan ilmenemistaajuuksien (alkutapahtumataajuus) ja korjausaikojen avulla. Alkutapahtumataajuudet yhteismitallistetaan korjausaikojen kanssa muuttamalla alkutapahtumataajuudet vikaantumisajoiksi. PRA:n yhteydessä on arvioitu alkutapahtumataajuudet, mutta korjausajat arvioidaan tämän työn yhteydessä. Näille eri ajoille kerätään dataa eri lähteistä ja näitä analysoidaan eri menetelmin. Tässä luvussa käsitellään erikseen vikaantumis- ja korjausajan analysointimenetelmät koska nämä eroavat toisistaan.

Loviisan ydinvoimalaitos

Suurten riskien mallin lähtökohtana on PRA:n alkutapahtumat. Arvion mukaan monessa alkutapahtumassa alkutapahtumataajuus on arvioitu lievempien tapahtumien perusteella, kuin tapahtuma, jonka ilmenemistaajuutta arvioidaan. Tällöin alkutapahtumataajuus on suurempi, tai konservatiivisempi, kuin paras estimaatti alkutapahtumataajuudelle. PRA:ssa arviot ovat aina mieluummin konservatiivisia kuin optimistisia. PRA:n kehityksen yhteydessä sydänvaurion kannalta merkittävimpiä alkutapahtumataajuuksia on tarkennettu ja pienennetty. Osa alkutapahtumista ei kuitenkaan ole merkittäviä sydänvaurion kannalta, vaikka ne ovat merkittäviä käytettävyyden kan-

nalta. Esimerkkejä tällaisista alkutapahtumista ovat laajat öljypalot ja tulvat turpiinirakennuksessa.

Turpiinirakennuksen laajoja öljypaloja sanotaan PRA-mallissa turpiinivaurioiksi ja huonetyypin TM paloiksi. Turpiinivaurioiden alkutapahtumataajuudessa huomioidaan monta nopeasti korjattua tapahtumaa, vaikka asiantuntija-arvioiden mukaan näistä aiheutuu pitkiä seisokkeja. Turpiinirakennuksen tulvat on eritelty tulvan pinnankorkeuden mukaan kolmeen eri korkeuteen, VC1/2/3FLOOD. Jokaisella pinnankorkeudella alkutapahtumataajuus on arvioitu alimman pinnankorkeuden mukaan. Erityisesti VC2FLOOD-tulvan kohdalla korjausaika-arvio muuttuu monikymmenkertaiseksi riippuen, nouseeko vedenpinta alimmalle vai ylimmälle tasolle. Tulvimiskorkeudet on määritetty niin, ettei sydänvaurion kannalta ole merkitystä nouseeko vedenpinta alimmalle vai ylimmälle tasolle. (Jänkälä, et al., 2014b)

Muut ydinvoimalaitokset

Yksittäisistä tapahtumista kerätään yksityiskohtaisia tietoja IAEA:n IRS palvelusta. IAEA:n PRIS on kuitenkin parempi palvelu arvioitaessa vaikutusta käytettävyyteen. PRIS palvelusta löytyy tuotantotappion määrä megawattitunteina ja korjausaika. Jos korjausajassa ei huomioida aiheutettua tuotantotappiota ainakin seuraavia ongelmia voi ilmetä:

- Laite ei ole kriittinen tuotannon kannalta tai laitteella on varalaite. Tällöin laitteen koko korjausaika ei aiheuta tuotantotappiota.
- Laitevikaantuminen tai onnettomuus tapahtuu kun voimalaitos ei ole tuotannossa. Tällöin laite saatetaan korjata hitaammin, kuin tapauksissa joissa laitteen vikaantuminen on suora este voimalaitoksen tuotannolle.

Yllä olevista syistä tässä työssä kerätään korjausaikoja suurille käytettävyyssriskeille ainoastaan PRIS palvelusta. IRS palvelusta kerätään tarvittaessa lisätietoja onnettomuuksista. PRIS palvelusta kerätään kahdella tavalla aineistoa:

- Alkutapahtumataajuuksien arvioinnissa käytettyjen tapahtumien korjausaikadatan kerääminen. Nämä tapahtumat kerätään käyttäen vuoden 2004 PRIS versiota (IAEA, 2004b).
- Korjausaika järjestelmille tai laitteille, joiden vioittumiselle on oma alkutapahtuma, mutta kyseisen järjestelmän tai laitteen vikaantumisia ei ole sattunut Loviisan ydinvoimalaitoksella. Lisäksi järjestelmän pitää löytyä PRIS palvelun järjestelmä- tai komponenttilistauksesta. Tällaisille alkutapahtumille haetaan keskimääräinen vastaavien järjestelmien korjausaika uusimmasta PRIS

järjestelmästä (IAEA, 2015b). Näiden alkutapahtumien tietojen keräysasetukset luettelaa alla. Asetuksissa pois rajatut tapahtumat arvioidaan olevan joko nopeammin korjattavissa tai muuten eroavan arvioidusta alkutapahtumasta. Alla olevien asetusten lisäksi jokaisen alkutapahtuman kohdalla valitaan tuotantotappion aiheuttaneeksi järjestelmäksi haluttu järjestelmä tai komponentti (engl. system/component). Järjestelmät ja komponentit listataan alkutapahtumätiedoissa liitteessä 2.

- Reaktoreista mukana kaikki PWR ydinvoimalaitosyksiköt.
- Vuodet 1970-2014. Tarkoittaa koko käytössä olevaa aineistoa hakuhetkellä.
- Ainoastaan ei suunnitellut tuotantotappiot (engl. unplanned).
- Ainoastaan koko ydinvoimalaitosyksikön alasajon aiheuttaneet tuotantotappiot (full).
- Ydinvoimalaitosyksikön alasajon tapa. Huomioidaan seuraavat: hallittu alasajo (deferred shutdown), välitön alasajo alle 24 tuntia vian ilmenemisen jälkeen (immediate shutdown), automaattinen pikasulku (automatic scram) ja manuaalinen pikasulku (manual scarm). Ei huomioida suunniteltujen huoltojen venymistä (outage extension).
- Huomiodut syyt (cause): voimalaitosyksikön laitteisto-ongelma tai vikaantuminen (plant equipment problem/failure).

PRIS palvelun korjausaikadataa ei käytetä sellaisenaan. Jokaisen alkutapahtuman kohdalla arvioidaan datan hyvyys ja tulosten vastaavuus asiantuntija-arvioihin. Datan hyvyydellä tarkoitetaan datan kattavuutta:

- Vastaavatko huomiodut tapahtumat alkutapahtuman määritelmää, vai ovatko ne lievempiä tai vakavampia? PRA sisältää konservatiivisia arvioita mistä seuraa, että tapahtumat voivat olla lievempiä kuin tapahtuman määritelmä PRA:ssa. Konservatiivisuudesta johtuen huomioitujen tapahtumien ei pitäisi olla vakavampia kuin alkutapahtuman määritelmä (Jänkälä, et al., 2014b).
- Kuinka suurelle osalle huomioduista alkutapahtumista löytyy korjausaika ja vastaavatko nämä tapahtumat alkutapahtuman määritelmää vai ovatko ne lievempiä tai vakavampia?

Korjausaika

Tässä alaluvussa käydään läpi menetelmät, joilla arvioidaan korjausaika-arviot alkutapahtumille joille kerätään useasta lähteestä korjausaika. Alkutapahtumille kerätään korjausaikadataa siis kolmesta eri lähteestä: ydinvoimalaitosten historiasta ja kahdelta

eri asiantuntijaryhmältä (PRA-ryhmä ja Loviisan henkilökunta). Suurelle osalle alkutapahtumista kerätään kuitenkin vain yksi korjausaika.

Korjausaika-arvioinnissa käytetään seuraavanlaista iteratiivista prosessia:

1. Diplomityöntekijä arvioi korjausajat alkutapahtumille ja osa korjausajoista arvioidaan historian perusteella. Korjausaikojen arvioinnissa käytetään tässä työssä aiemmin esitettyä aineistoa.
2. PRA ryhmä arvioi korjausajat ja korjausaikadatan luotettavuuden.
3. Tarvittaessa palataan takaisin vaiheeseen 1. minkä jälkeen siirrytään vaiheeseen 4.
4. Noin 20 - 25 merkittävintä alkutapahtumaa arvioidaan Loviisan henkilökunnan kanssa. Myös PRA ryhmän jäseniä on mukana kokouksessa antamassa lisätietoja alkutapahtumista.
5. Tarvittaessa palataan takaisin vaiheeseen 1. ja tämän jälkeen arvioidaan tilanne uudelleen.

Palaaminen vaiheeseen 1. tarkoittaa pääasiassa lisädatan keräämistä joillekin alkutapahtumille. Vaiheen 4. jälkeen palaaminen vaiheeseen 1. voi johtua lähinnä eroista eri asiantuntijaryhmien arvioissa. Jokaisessa kokouksessa jokaiselle alkutapahtumalle arvioidaan yksi korjausaika.

Yllä olevasta monivaiheisesta korjausaika-arvioinnista johtuen osalla alkutapahtumista on useita korjausaika-arvioita. Kaikkien arvioiden epäluotettavuudesta johtuen korjausajassa huomioidaan kaikki arviot, tilanteesta riippuu kuinka suurella painotuksella mitäkin arvioita painotetaan. Eri korjausaika-arviot ja niiden painotukset lopullisessa korjausajassa löytyvät liitteestä 2.

Arvioinnin tarkkuuksien eroja ja syitä eri painotuksille:

- PRA-ryhmä: Korjausaika-arvioinnista ei kokemusta.
- Loviisan henkilökunta: Korjausajan arviointi luotettavampaa kuin PRA ryhmällä, mutta PRA ryhmällä on parempi ymmärrys alkutapahtumasta.
- Data: Alkutapahtumataajuuden arvioinnissa huomiodut tapahtumat eivät välttämättä vastaa alkutapahtumaa. Kaikille tapahtumille ei löydy korjausajoja tai järjestelmän tai komponentin menetys PRIS palvelussa ei vastaa alkutapahtumaa. Katso aineistoanalyysi -luvun muut osat.

Eri korjausaikojen lähteiden lisäksi arvioituun korjausaikaan vaikuttaa alkutapahtumataajuuksien yhdistäminen. Suurten riskien mallin on tarkoitus kuvata koko PRA-

mallin käytettävyyssvaikutusta. PRA-mallin käytettävyyssvaikutusten arviointiin valittiin PRA-mallin alkutapahtumien huomiointi. Alkutapahtumat huomioidaan alkutapahtumataajuuksien ja korjausaikojen avulla. Tämän työn yhteydessä alkutapahtumataajuuksia yhdistetään isommiksi kokonaisuuksiksi. Alkutapahtumataajuuksien yhdistämisen seurauksena käytettävyyssanalyysin lopputulos ei saa muuttua. Luvussa 3.3.2 arvioidaan alkutapahtumataajuuksien yhdistämisen vaikutusta kokonaiskäytettävyyteen ja miten usean komponentin ryhmälle saadaan kokonaisvikaantumis- ja kokonaiskorjaus aika komponenttikohtaisista arvoista niin, ettei kokonaisuuden käytettävyyks muutu. Arvioinnin perusteella kokonaiskäytettävyyks ei muutu diplomityön tulosten kannalta merkittävästi, kunhan yhdistettävien alkutapahtumataajuuksien korjausajat ovat saman suuruiset. Korjausajaltaan eri suuruisten alkutapahtumien yhdistämistä yksittäisiksi kokonaisuuksiksi ei arvioida.

Vikaantumisaika

Suurten riskien analyysin perustana on PRA-mallin alkutapahtumat. Tässä luvussa käydään läpi alkutapahtumien vikaantumisaikojen arviointimenetelmät. PRA-mallissa alkutapahtumille on arvioitu vikaantumistaajuuks, mutta näitä ei oteta PRA-mallista sellaisenaan käytettävyyssmalliin.

PRA-mallin alkutapahtumataajuustaulukossa on yli 10 000 alkutapahtumataajuutta (827 alkutapahtumaa ja arviot 17 vakiotilalle) (Jänkälä, et al., 2014b). Kaikille yli 10 000 alkutapahtumataajuudelle ei arvioida omaa korjausaikaa. Alkutapahtumataajuuksia yhdistetään isommiksi kokonaisuuksiksi, jotka sisältävät useita alkutapahtumataajuuksia ja näillä arvioidaan kaikilla olevan yhtä suuret korjausajat. Alkutapahtumataajuuksia yhdistetään seuraavilla tavoilla:

- *Loviisan ydinvoimalaitoksen vakiotilat.* PRA-mallissa jokaiselle alkutapahtumalle määritetään oma alkutapahtumataajuus jokaiselle vakiotilalle (Jänkälä, et al., 2014b). Käytettävyyssmallissa huomioidaan erikseen ainoastaan seisokkivakiotilat (B...Q) ja tehoajon vakiotilat (A ja P). Tehoajon alkutapahtumataajuuteen summataan yhteen tehoajon alkutapahtumataajuuks ja vastaavasti seisokkitilan alkutapahtumataajuuteen summataan yhteen seisokkitilojen alkutapahtumataajuuks.
- *Vikapuilla mallinnetut alkutapahtumataajuuks PRA-mallissa.* Tällaisissa tapauksissa PRA-mallista lasketaan alkutapahtumataajuus vikapuun huipputapahtumalle. Esimerkkinä tällaisesta on vuodot. Monessa vuodossa ei tapahdu mitään merkittävää käytettävyyden kannalta, jos vuoto saadaan eristettyä.

Eristetystä vuodosta ei yleensä aiheudu Lo1:n alasajoja eikä näitä silloin edes lasketa alkutapahtumiksi.

- *PRA-mallin alkutapahtumataajuus ei kuvaa sopivaa tilannetta käytettävyyss-mallin alkutapahtumalle.* Esimerkki tällaisesta tapahtumasta on pikasulun epäonnistuminen pikasulkuvaateen yhteydessä (ATWS). Alkutapahtumataajuustaulukossa tälle tapahtumalle ilmoitetaan pikasulun ilmenemistäajuus. ATWS:n tapauksessa sopivin alkutapahtumataajuus käytettävyyssmalliin on se millä taajuudella pikasulku epäonnistuu. Myös tällaisissa tapauksissa sopiva alkutapahtumataajuus lasketaan PRA-mallista.

4.2.3 Mallinnus

Suurten riskien käytettävyyssarviointissa lähtökohtana on PRA:n alkutapahtumat. Kaikki alkutapahtumat aiheuttavat Loviisan ydinvoimalaitoksen ykkösyksikön (Lo1) alasajon, joten niistä kaikista aiheutuu 100 % tuotantotappio kunnes alkutapahtuma saadaan korjattua ja Lo1 saadaan takaisin tuotantoon. Tuotantotappiossa ei huomioida alasajon ja ylösajon nopeuksia.

Tässä luvussa käydään läpi menetelmät suurten riskien epäkäytettävyyden arvioinnissa lähtien liikkeelle yksittäisten alkutapahtumien arvioinnilla ja lopulta päädytään kaikkien alkutapahtumien yhteisepäkäytettävyyteen. Lopuksi käydään läpi paloalkutapahtumien mallinnuksessa käytetyt lisämenetelmät. Ensin vielä esitellään käytetty ohjelmisto ja syyt sen käytölle.

Ohjelmisto

Osa PRA:n alkutapahtumista on niin harvinaisia että niiden mallinnus ei onnistu Miriam RAM Studion nykyisellä versiolla (1.01.64). Tästä syystä analyysit tehdään Microsoft Excelissä. Harvinaisimmat PRA-mallissa huomioidut alkutapahtumat tapahtuvat keskimäärin harvemmin kuin kerran 10 000 000 000 vuodessa (alkutapahtuma: ITH20Z00FK). Miriam RAM Studioissa simulointitoistojen maksimimäärä on rajattu 100 000 kappaleeseen simulointia kohden. 20 vuoden simulaatiopituudella simuloitu kokonaisaika on yhteensä enintään 2 000 000 vuotta. Keskimäärin 2 000 000 vuodessa ehtii tapahtua vain pieni osa alkutapahtumista.

Osa harvinaisimmista alkutapahtumista, jotka arvioidaan nopeasti korjattaviksi, jätetään huomioimatta koska, näistä aiheutuva epäkäytettävyys on erittäin pieni. Esimerkkejä tällaisista alkutapahtumista ovat maanjäristykset. Maanjäristysalkutapahtumista yleisin on IQUAKE055. Se tapahtuu arvion mukaan noin kerran 30 000 vuodessa. Harvinaisin maanjäristysalkutapahtuma, IQUAKE400, arvioidaan tapahtuvan noin kerran 500 000 000 vuodessa (Jänkälä, et al., 2014b).

Vaiheet suurten riskien mallinnuksessa

Seuraavaksi käydään läpi suurten riskien käytettävyyssanalyysin laskennan menetelmät. Näillä menetelmillä lasketaan Microsoft Excel:ssä suurten riskien käytettävyys. Aineistoanalyysin jälkeen lähtötietona on joukko alkutapahtumia joille on arvioitu keskimääräiset vikaantumisajat $MTTF_i$ ja korjausajat $MTTR_i$. Vikaantumisajat saadaan käänteislukuina PRA:n alkutapahtumataajuuksista. Alkutapahtumataajuudet arvioidaan erikseen seisokitiloille ja tehoajolle. Seisokitiloissa korjausajat arvioidaan viikon lyhyemmiksi kuin tehoajolla.

Tehoajo ja seisokki

Jokaiselle alkutapahtumalle lasketaan epäkäytettävyys seisokissa ja tehoajolla. Epäkäytettävyydet saadaan yhtälöllä (3-6) keskimääräisistä vikaantumis- ja korjausajoista ($MTTF_i$ ja $MTTR_i$). Epäkäytettävyyksistä saadaan käytettävyydet yhtälöllä (3-7).

Alkutapahtumat eri vakiotiloissa arvioidaan toisistaan riippumattomiksi ja verrattaviksi sarjaan kytkettyihin komponentteihin. Tällöin molempien komponenttien pitää toimia, että koko järjestelmä toimii ja tällöin koko alkutapahtuman käytettävyys saadaan seisokin käytettävyyden ja tehoajon käytettävyyden tulona yhtälöllä (3-4). Alkutapahtuman epäkäytettävyys on jälleen käytettävyyden komplementti ja saadaan yhtälöllä (3-7).

Suurten riskien aiheuttama epäkäytettävyys

Jokaiselle alkutapahtumalle on tässä vaiheessa yksi käytettävyys. Suurten riskien yhteisepäkäytettävyys saadaan alkutapahtumien käytettävyyksien avulla. Suuret riskit arvioidaan toisistaan riippumattomiksi ja verrattavissa sarjaan kytkettyihin komponentteihin. Tällöin kaikkien komponenttien, tai alkutapahtumien, pitää olla tilassa missä ne eivät aiheuta epäkäytettävyyttä. Tällöin suurten riskien kokonaiskäytettävyys on alkutapahtumien käytettävyyksien tulo, yhtälö (3-4).

4.2.4 Suurten riskien palomalli

Palomallissa käytetään kaikkia suurten riskien mallin menetelmiä. Näiden lisäksi palomallin alkutapahtumataajuuksien yhdistämisessä ja arvioinnissa käytetään omia menetelmiä. Paloissa käytetään muista poikkeavia menetelmiä koska niiden mallintaminen samoilla menetelmillä on hankalaa. Paloalkutapahtumia on paljon ja niiden mallinnus eroaa PRA-mallissa muista alkutapahtumista. Tässä luvussa mainitaan ensin tarvittavat tiedot palo-PRA:sta ja sitten siirrytään mallinnusmenetelmiin.

Palo-PRA

Paloalkutapahtumia on paljon. Jokaiselle sydänvaurion kannalta merkittävälle huoneelle on arvioitu oma syttymistaajuus jokaiselle vakiotilalle. Yli puolet Loviisan ydinvoimalaitoksen alkutapahtumataajuuksista on palo-PRA:n syttymistaajuuksia. Palo-PRA:ssa on mukana yli puolet Loviisan ydinvoimalaitoksen huoneista. Niiden palojen seurauksena voi olla sydänvaurio (Jänkälä, et al., 2014b). Näiden lisäksi voi olla huoneita, joiden palojen seurauksena on tehonrajoitus tai alasajo. Tämän työn laajuuteen ei sovi jokaisen huoneen ja syttymistaajuuden käytettävyyssarviointi erikseen.

Palo-PRA eroaa muusta Loviisan PRA:sta ainakin alkutapahtumataajuuden huomioinnin osalta. PRA-mallissa huomioidaan palotapahtumista syttymistaajuudet, jotka eivät ole vielä alkutapahtumia eivätkä välttämättä aiheuta voimalaitoksen alasajoa tehoajolta, kuten muut alkutapahtumat. Paloalkutapahtumien syttymistaajuudet ilmoitetaan PRA-mallissa alkutapahtumataajuustaulukossa, vaikka näitä syttymistaajuuksia ei tulkita alkutapahtumiksi. Pääsääntöisesti palon syttymisestä aiheutuu alkutapahtuma syttymisen jälkeen vasta jollain todennäköisyydellä. Syttymisestä ei esimerkiksi aiheudu alkutapahtumaa, jos sprinklerijärjestelmä tai palokunta saa sammutettua palon ennen kuin siitä aiheutuu vahinkoa. (Jänkälä, et al., 2014b)

Käytettävyyssmallissa palo-PRA:sta huomioidaan huonetyyppikohtaiset syttymistaajuudet alkutapahtumataajuuksien sijaan. Viimeisin huonetyyppikohtaisten syttymistaajuuksien päivitys on tehty vuonna 2015 (Sirén, 2015). Päivityksen yhteydessä uutena aineistona huomioitiin Loviisan ydinvoimalaitoksen kaikki palot sekä OECD-FIRE-tietokanta vuodelta 2013. Huonetyyppejä on yhteensä 17.

Paloalkutapahtumien käytettävyyssmallinnus

Käytettävyyssmallissa huonetyypit huomioidaan vastaavasti kuin muut alkutapahtumat. Ainoastaan vikataajuuden arvioinnissa käytetään erilaisia menetelmiä. Lisäksi korjausajan arvioinnissa määritellään tilanteet minkä korjausajat arvioidaan, nämä eivät suoraan vastaa PRA:n tilanteita. Huonetyyppien palotaajuuksia ja sitä kautta vikaantumisaikoja ei arvioida erikseen seisokille ja tehoajolle, koska niitä ei ole valmiiksi arvioituna huonetyypeille. Muutama huonetyyppi arvioidaan useassa osassa ja lopputuloksena käytettävyyssmallin palot huomioidaan 20 huonetyypillä. Huonetyyppien mallinnustiedot löytyvät liitteestä 2. Tässä luvussa käydään ensin läpi kaikkia huonetyyppejä koskevat menetelmät ja sen jälkeen poikkeukset. Kaikkia huonetyyppejä koskevat yksinkertaistukset ja oletukset:

- Jokaisen huoneen palon oletetaan aiheuttavan Lo1:n alasajon tehoajolla, jos sprinklerijärjestelmä ei onnistu palon sammuttamisessa tai huoneessa ei ole sprinklerijärjestelmää. Tällaisessa tilanteessa koko palohuone oletetaan mene-
tetyksi palon seurauksena.
- Sprinklerijärjestelmän toimiessa palot onnistutaan sammuttamaan niin nopeas-
ti, että vikaantumisen arvioidaan kuuluvan yleisiin komponenttivikoihin eikä
sitä huomioida suurena käytettävyyseriskinä.
- Palojen ei oleteta leviävän palohuoneesta toiseen koska palokunta ja muut Lo-
viisan ydinvoimalaitoksen palon rajaamisen toimenpiteet estävät palon leviä-
misen.
- Saman huonetyypin huoneet aiheuttavat palaessaan korjausajaltaan yhtä pitkän
seisokin jos sammutus ei onnistu riittävän nopeasti.

Huonetyyppien mallinnuksessa käytettävä vikataajuus eli palotaajuus $HTf_{A,j}$ laske-
taan seuraavalla yhtälöllä huonetyypille j

$$HTf_{A,j} = HTf_j * \sum_{i=1}^3 (1 - R_i) P_{i,j}, \quad (4-2)$$

missä HTf_j on huonetyypin j syttymistaajuus Loviisan ydinvoimalaitoksen
PRA:ssa, R_i on sammutusjärjestelmän i toimivuustodennäköisyys ja $P_{i,j}$ on ehdolli-
nen todennäköisyys sammutusjärjestelmälle i palon syttyttyä huonetyypin j huoneessa.
Yhtälö (4-2) on johdettu niin, että se huomioi yllä esitetyt oletukset ja yksinkertais-
tukset. Sammutusjärjestelmistä huomioidaan kolme eri tyyppiä: automaattinen sprin-
klerijärjestelmä ($i = 1$), manuaalinen sprinklerijärjestelmä ($i = 2$) ja palokunta ($i = 3$).
Loviisan ydinvoimalaitoksen hiilidioksidisammutusjärjestelmää ei huomioida erik-
seen vaan se rinnastetaan automaattiseen sprinklerijärjestelmään. Loviisan ydinvoima-
laitoksella on myös joitain muita sammutusjärjestelmiä, mutta näitä ei joko huomioida
tai näitä ei ole käytössä PRA:ssa huomioiduissa huoneissa.

Taulukossa 4-1 on sammutusjärjestelmien toimivuustodennäköisyydet Loviisan ydin-
voimalaitoksen PRA-mallista (Jänkälä, et al., 2014b). Näissä arvoissa on hieman vaih-
telua riippuen järjestelmästä. Käytettävyyksmallissa käytetään konservatiivisimpia eli
pienimpiä toimivuustodennäköisyyksiä. Manuaalisen sprinklerijärjestelmän toimi-
vuustodennäköisyydessä huomioidaan sprinklerien toimivuuden lisäksi palovaroitus-
järjestelmä ja operaattorin toiminta. Taulukossa 4-2 on manuaaliseen sprinklerijärjes-
telmään liittyvien osajärjestelmien toimivuustodennäköisyydet. Manuaalinen sprin-
klerijärjestelmä onnistuu sammuttamisessa vain, kun jokainen huomioitu osajärjestelmä
toimii ja kokonaistoimivuustodennäköisyys on osatoimivuustodennäköisyyksien tulo,

kaava (3-4), $0,9577 * 0,99 * 0,99 = 0,9386$. Palokunnan toimivuustodennäköisyys on 0 %, koska palokunnan ei arvioida sammuttavan paloa riittävän nopeasti. Mallinus onnistuu myös yksinkertaisemmin, kun palokunnan vaikutusta ei huomioida.

Taulukko 4-1. Sammutusjärjestelmien toimivuustodennäköisyydet R_i .

i	R_i	Järjestelmä
1	95,77 %	Automaattinen sprinklerijärjestelmä
2	93,86 %	Manuaalinen sprinklerijärjestelmä
3	0 %	Palokunta

Taulukko 4-2. Manuaalisessa sprinklerijärjestelmässä tarvittavien osajärjestelmien toimivuustodennäköisyydet.

Toimivuustodennäköisyys	Osajärjestelmä
95,77 %	Sprinklerijärjestelmä
99 %	Palovaroitusjärjestelmä
99 %	Operaattori

$P_{i,j}$ arvoja varten kerätään palo-PRA:n huoneiden sammutusjärjestelmätiedot ja syttymistäajuuudet P_{fi} . Sammutusjärjestelmätiedot saadaan syttymätaajuuksien päivityksen raportista (Sirén, 2015). Tiedot sammutusjärjestelmistä saadaan FSAR (Final Safety Analysis Report) dokumentista (Pesonen & Karhula, 2014). Ehdolliset sammutusjärjestelmätodennäköisyydet lasketaan yhtälöllä

$$P_{i,j} = \frac{\sum_{k \in i,j} P_{fi,k}}{\sum_{k \in j} P_{fi,k}}, \quad (4-3)$$

missä merkintä $\sum_{k \in i,j} P_{fi,k}$ tarkoittaa, että summataan syttymistäajuuudet huoneista, jotka kuuluvat huonetyypiin i ja joissa on sammutusjärjestelmä j . Merkintä $\sum_{k \in j} P_{fi,k}$ tarkoittaa, että summataan kaikki huonetyypin j syttymistäajuuudet. Jos huonetyypin kaikissa huoneissa on sama sammutusjärjestelmä, tälle sammutusjärjestelmälle tulee todennäköisyys 1 ja muut saavat todennäköisyyden 0. Suuri osa huonetyypeistä on tällaisia.

Yhtälö (4-3) noudattaa bayesin ehdollisen todennäköisyyden teoriaa (Bayes, 1763). $P_{i,j}$ on todennäköisyys että huonetyypin i huoneessa on sammutusjärjestelmä j , kun tiedetään, että jossain huonetyypin i huoneessa on syttynyt tulipalo. $\sum_{k \in i,j} P_{fi,k}$ on todennäköisyys että huonetyypissä i on tulipalo ja kyseisessä huoneessa on sammu-

tusjärjestelmä j . $\sum_{k \in j} P_{fi,k}$ on todennäköisyys huonetyypin i tulipalolle. Todennäköisyyksien sijaan tässä yhteydessä on kyse syttymistaajuuksista. Syttymistaajuus kuvaa kuitenkin todennäköisyyttä tulipalolle aikayksikössä. Lisäksi todennäköisyyksien summasta tulee hieman isompi kuin todellinen kokonaistodennäköisyys. Näillä eroilla bayesin teoreemaan ei arvioida olevan merkittävää vaikutusta.

Kaikkien huoneiden sammutusjärjestelmistä ei ole tietoja. Nämä huoneet jätetään huomioimatta laskettaessa $P_{i,j}$ arvoja. Tällaisia huoneita on alle 10 % PRA:ssa huomioituista huoneista ja näiden lisäksi kaikki huoneet joita ei huomioida PRA:ssa. Jos laskennassa huomioitaisiin kaikki huoneet, yhtälön (4-3) nimittäjä vastaisi huonetyypin syttymistaajuutta HTf_j .

Palo-PRA:ssa arvioidaan kuinka suuri osuus jokaisesta huonetyypistä kuuluu mallinnuksen piiriin ja tämän mukaisesti huonetyypeissä huomioidaan vain osa huonetyypin kokonaissyttymistaajuudesta. Käytettävyyssmallissa ei arvioida jokaisen huoneen tärkeyttä erikseen, joten käytettävyyssmallissa huomioidaan kaikkia huoneet. Käytettävyyssmallia varten Palo-PRA:n huoneista kerätään tiedot sammutusjärjestelmistä ja syttymistaajuudet. Sammutusjärjestelmätiedot saadaan syttymätaajuuksien päivityksen raportista (Sirén, 2015). Tiedot sammutusjärjestelmistä saadaan FSAR dokumentista (Pesonen & Karhula, 2014).

Poikkeukset paloalkutapahtumien käytettävyyssmallinnuksessa

Suurten riskien mallin paloalkutapahtumien mallinnuksessa on kolme poikkeustapausta, jotka sisältävät erilaisia menetelmiä kuin muut. Nämä poikkeustapaukset ovat käytettävyyssmallin huonetyypit T-RC, TB2 ja TG2. Kaikki poikkeukset liittyvät turpiinrakennukseen ja yksittäisen palo-PRA:n huonetyypin käytettävyyssmallinnukseen kahdella eri tavalla.

Huonetyypin T-RC palotaajuus $HTf_{A,T-RC}$ lasketaan kaavalla

$$HTf_{A,T-RC} = HTf_{T-RC} * R_1 * (1 - R_1). \quad (4-4)$$

Huonetyypissä T-RC on käytössä kahdennettu automaattinen sprinklerijärjestelmä: kohdesuojaus- ja yleissprinklerijärjestelmä. Käytettävyyssmallissa huomioidaan ainoastaan tilanne jossa yleissprinklerijärjestelmä toimii, mutta kohdesuojaussprinklerijärjestelmä ei toimi. Muissa tapauksissa joko aiheutuu suoraan sydänvaurio tai sammutusjärjestelmät saavat sammutettua palon ennen merkittäviä vahinkoja. Yhtälössä (4-4) todennäköisyys $R_1 * (1 - R_1)$ kuvaa todennäköisyyttä tilanteelle, missä yleissprinklerijärjestelmä toimii, mutta kohdesuojaus ei toimi.

Huonetyypeissä TB2 ja TG2 huomioidaan turpiinin ja generaattorin palaessa, että toinen turpiini ja generaattori saadaan nopeammin tuotantoon kuin palanut turpiini tai generaattori. Huonetyypit TB2 ja TG2 kuvaavat myöhemmin käyttöön saatavan turpiinin ja generaattorin korjaustyön vaikutusta käytettävyyteen. Nämä huonetyypit ovat ainoita alkutapahtumia, joiden huomioidaan aiheuttavan vain osittainen voimalaitoksen alasajo. Näissä tapauksissa lasketaan efektiivinen korjausaika niin että yhtälöllä (3-3) voidaan laskea alkutapahtuman käytettävyys. Tuotantotappion arvioidaan olevan 50 % kokonaistehosta, kun käytetään vain toista turpiinia tai generaattoria. Tällöin efektiivinen korjausaika on 50 % pienempi, kuin arvioitu kokonaiskorjausaika.

4.3 Suurten riskien mallin ja yleismallin tulosten yhdistäminen

Tässä vaiheessa mallinnusta on tiedossa:

- Suurten riskien epäkäytettävyys \bar{A}_{SR} ja käytettävyys A_{SR}
- Alkutapahtumien epäkäytettävyydet $\bar{A}_{i,SR}$ ja käytettävyydet $A_{i,SR}$
- Yleismallin epäkäytettävyys \bar{A}_Y ja käytettävyys A_Y
- Yleismallin tuotantotappioiden osuudet yleismallin kokonaisepäkäytettävyydestä $I_{i,Y}^Y$

Koko Lo1 ydinvoimalaitosyksikön käytettävyys A_{Lo1} saadaan yleismallin ja suurten riskien mallin käytettävyyksien tulona $A_{Lo1} = A_Y \cdot A_{SR}$, kaava (3-4). Lo1:n epäkäytettävyys \bar{A}_{Lo1} on jälleen komplementti Lo1:n käytettävyydestä $\bar{A}_{Lo1} = 1 - A_{Lo1}$, kaava (3-7). Yksittäisen tuotantotappion aiheuttama osuus kokonaisepäkäytettävyydestä saadaan jakamalla tuotantotappion epäkäytettävyys kaikkien tuotantotappioiden epäkäytettävyyksien summalla

$$I_{i,j} = \frac{\bar{A}_{i,j}}{\sum_k \sum_z \bar{A}_{k,z}}, \quad (4-5)$$

missä i kuvaa kaikkia tuotantotappiota sekä yleismallissa että suurten riskien mallissa. j on joko suurten riskien malli tai yleismalli. Miriam RAM Studio ei anna yksittäisille tuotantotappiolle vastaavaa epäkäytettävyyttä $\bar{A}_{i,Y}$, jota käytetään suurten riskien analyttisessä laskennassa $\bar{A}_{i,SR}$. Yleismallin tuotantotappioiden epäkäytettävyydet approksimoidaan kaavalla

$$\bar{A}_{i,Y} = I_{i,Y} \sum_i \bar{A}_{i,Y} \approx I_{i,Y}^Y \bar{A}_Y. \quad (4-6)$$

Luku 5

Tulokset

Tässä luvussa esitetään Loviisan ensimmäisen ydinvoimalaitosyksikön (Lo1) käytettävyyssanalyysin tulokset. Kaikki tulokset ilmoitetaan prosenteissa suhteessa nimellistehoon tai nimellistuotantoon. Analyysi koostui kahdesta erillisestä kokonaisuudesta: yleismallista ja suurten riskien mallista. Yleismalli sisältää yleisimmät Lo1:n tuotantotappiot ja suurten riskien malli sisältää suuret käytettävyyssriskit, joista aiheutuu pitkiä seisokkeja.

Tässä työssä huomioidut suuret käytettävyyssriskit ovat huomattavan harvinaisia. merkittävä osa suurista käytettävyyssriskeistä ei ennusteen mukaan tapahdu kertaakaan ydinvoimalaitoksen käyttöiän aikana. Yleismallin tuotantotappiot arvioitiin Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöhistorian perusteella. Loviisan ydinvoimalaitoksen yleiskuvauksen perusteella rakennettiin malli kuvaamaan Lo1:n toimintaa ja tähän mallin sisällytettiin tuotantotappiot aineistoanalyysin perusteella.

Molempien mallien tuloksissa esitetään ennustettu käyttökertoimen arvo ja jokaisen tuotantotappion aiheuttama osuus kokonaistuotantotappioista. Tarkat tiedot tuotantotappioista löytyy liitteestä 2. Lisäksi molempien mallien tuotantotappioista esitetään koosteet vikakokonaisuuksittain sekä tuotantotappion aikaisen tehon mukaisesti. Tarkat tiedot myös näistä löytyy liitteestä 2. Vikakokonaisuuksiin yhdistetään samaan järjestelmään kuuluvat tuotantotappiot tai saman tyyppiset tuotantotappiot yhdeksi vikakokonaisuudeksi. Yleismallissa huomioidaan yhteensä 19 vikakokonaisuutta ja suurten riskien mallissa neljä. Tuotantotappion aikaisella teholla tarkoitetaan sellaista tehoa, joka pystytään edelleen tuottamaan vaikka tuotantotappio on realisoitunut. Esimerkiksi toisen turpiinin pikasulku aiheuttaa 50 % tuotantotappion Lo1:llä. Yleismallissa ilmoitetaan lisäksi käyttökertoimen hajonta. Suurten riskien mallin käyttökertoimelle ei laskettu hajontaa, koska käyttökerroin arvioitiin analyttisellä laskennalla ilman erillistä käytettävyydenarviointityökalua.

5.1 Yleismalli

Yleismallissa vuosihuolto mallinnettiin vakiopituuisena 21,001 päivää. Tässä ajassa huomioidaan polttoaineenvaihtoseisokki ja lyhyt vuosihuolto, mutta ei neli- ja kahdeksanvuotisvuosihuoltoja. Vuosihuollon pituus otettiin PRA-mallista ja siinä laskettiin yhteen vakiotila B...Q.

Yleismallin vikaantumistiedot kerättiin Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöhistoriasta ja se sisältää ainoastaan tuotantotappioita aiheuttaneet viat. Vioista kerättiin korjausajat, päivämäärät ja tehonalennus tuotantotappion aikana. Vikaantumisajat ja korjausajat arvioitiin PREB menetelmällä.

Yleismallin aineistoanalyysin tulokset näkyvät liitteen 2 taulukossa L2-1. Tuotantotappioiden aikaiset tuotantotehot näkyvät liitteen 2 taulukossa L2-6. Aineistoanalyysin tulokset ovat tuotantotappiokohtaisia. Jokaiselle tuotantotappiolle valittiin sopiva korjausajan- ja vikaantumisajanjakauma sekä vikaantumistyyppi. Vikaantumistyyppissä ”ELAPSED” tarkoittaa, että vikaantuminen tapahtuu riippumatta voimalaitoksen tilasta tai komponentin käytöstä. Vikaantumistyyppi ”RUNNING” tarkoittaa että vikaantuminen voi tapahtua vain kun komponentti on käytössä. Vuosittain lähes samaan aikaan tapahtuvat määräaikaishuollot mallinnettiin tapahtuvaksi kiinteästi joka vuosi.

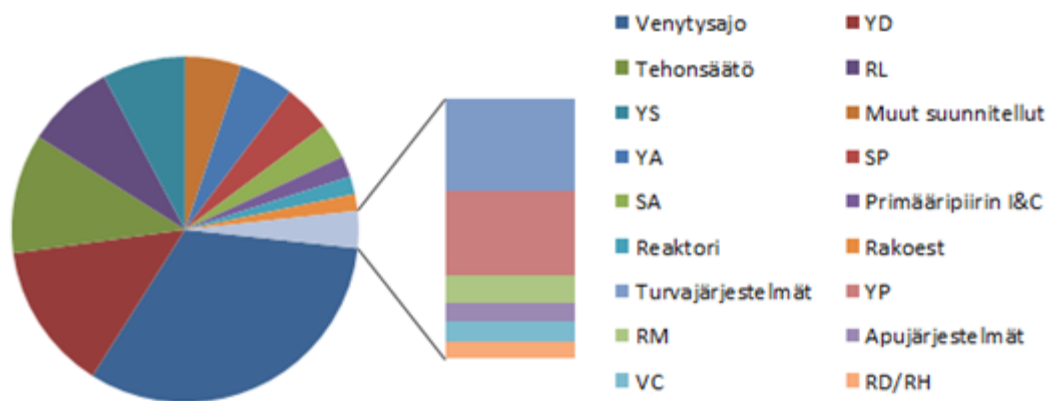
Yleismallin käytettävyyshlokkokaaviot näkyvät liitteessä 1. Käytettävyyshlokkokaaviot rakennettiin Miriam RAM Studioon Loviisan ydinvoimalaitoksen yleiskuvauksen perusteella sekä sen perusteella mitä vikoja Loviisan ydinvoimalaitoksella oli tapahtunut. Tapahtuneissa vioissa huomioitiin vain tuotantotappioita aiheuttaneet viat. Liitteen 1 käytettävyyshlokkokaaviot ovat suoria kopioita Miriam RAM Studiosta. Yleismallin tuotantotappioiden sijoittuminen yleismallin käytettävyyshlokkokaavioon näkyy liitteen 2 taulukossa L2-6.

Yleismallin ennustama käyttökerroin on 93,15 % ja sen hajonta 0,34 %. Ilman vuosihuollon vaikutusta malli ennustaa käytettävyydeksi 98,88 %. Taulukosta 5-1 löytyy tuotantotappiot vikakokonaisuuksittain ja niiden aiheuttama osuus kokonaistuotantotappioista vuosihuollon kanssa sekä ilman. Kuvassa 5-1 on sama tehoajonaikainen tieto kuvaajalla. Taulukossa 5-2 näkyy tuotantotappioiden jakaantuminen tuotantotappionaikaisen tehon mukaisesti. Myös tässä taulukossa on erikseen tehoajon ja koko vuoden tulokset. Kuvassa 5-2 on sama tieto tehoajolta kuvaajalla. Miriam RAM Studio antoi tulokseksi käyttökertoimen, sen hajonnan ja tuotantotappiokohtaiset tiedot. Koonnit taulukoihin 5-1 ja 5-2 saatiin laskemalla yhteen samoihin ryhmiin kuuluvat

tuotantotappiot. Tuotantotappiokohtaiset tulokset sekä tarkemmat tiedot tuotantotappioista löytyvät liitteen 2 taulukoista L2-1 ja L2-6.

Taulukko 5-1. Yleismallin tuotantotappioiden aiheuttama osuus kokonaistuotantotappiosta vikakokonaisuuksittain koko vuoden aikana ja ainoastaan tehoajolla.

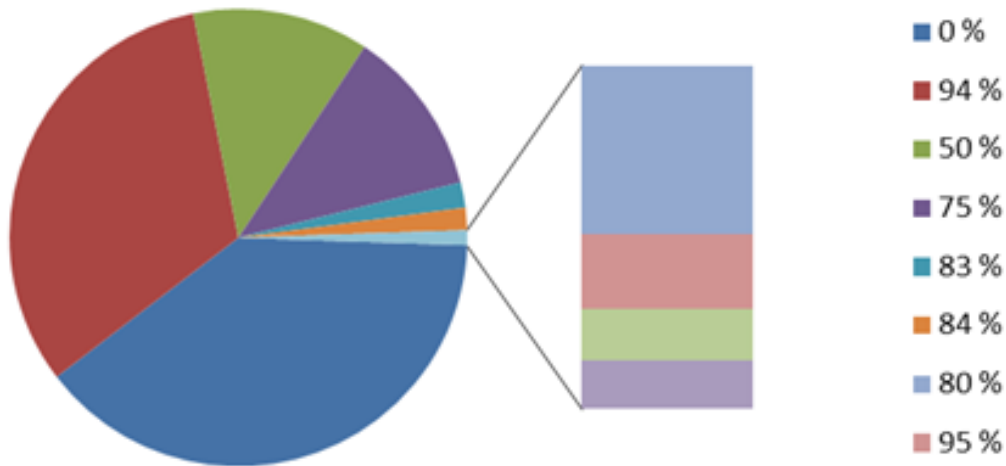
Vikakokonaisuus	Osuus tuotantotappiosta	Osuus tehoajon tuotantotappiosta
Vuosihuolto	83,62 %	
Venytysajo	5,28 %	32,23 %
YD	2,27 %	13,85 %
Tehonsäätö	1,83 %	11,19 %
RL	1,35 %	8,25 %
YS	1,27 %	7,73 %
Muut suunnitellut	0,86 %	5,23 %
YA	0,84 %	5,10 %
SP	0,73 %	4,43 %
SA	0,54 %	3,32 %
Primääripiirin I&C	0,32 %	1,97 %
Reaktori	0,27 %	1,66 %
Rakoest	0,26 %	1,58 %
Turvajärjestelmät	0,20 %	1,21 %
YP	0,19 %	1,13 %
RM	0,06 %	0,36 %
Apujärjestelmät	0,04 %	0,27 %
VC	0,04 %	0,26 %
RD/RH	0,04 %	0,23 %



Kuva 5-1. Yleismallin tuotantotappioiden aiheuttama osuus kokonaistuotantotappioista tehoajolla.

Taulukko 5-2. Yleismallin kokonaistuotantotappion jakaantuminen eri tuotantotappioidenaikaisille tehotasolle. Ilmoitetaan erikseen osuudet tehoajolla ja koko vuonna.

Teho tuotantotappion aikana	Osuus tuotantotappiosta	Osuus tehoajon tuotantotappiosta
0 %	90,02 %	39,07 %
94 %	5,28 %	32,23 %
50 %	2,04 %	12,46 %
75 %	1,94 %	11,82 %
83 %	0,29 %	1,78 %
84 %	0,26 %	1,58 %
80 %	0,08 %	0,52 %
95 %	0,04 %	0,23 %
90 %	0,03 %	0,16 %
25 %	0,02 %	0,15 %



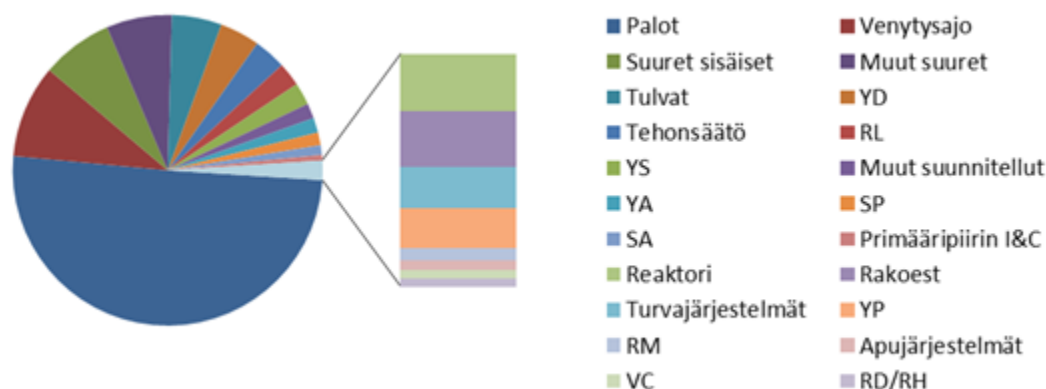
Kuva 5-2. Yleismallin tehoajonaikaisen tuotantotappion jakaantuminen eri tuotantotappioidenaikaisille tehotasolle.

5.2 Suurten riskien malli

Suurten riskien mallissa huomioitiin Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n alkutapahtumat. Alkutapahtumat mallinnettiin komponentteina, jotka olivat kytkettynä sarjaan. Jos yksikin alkutapahtuma realisoituu tehoajolla niin Loviisan ensimmäinen ydinvoimalaitosyksikkö ajetaan alas. Yhdessä suurten riskien malli ja yleismalli kuvaavat odotusarvoista käyttökerrointa Lo1:n loppukäyttöiällä. Myös suurten riskien malli missä on mukana yleismalli (myöhemmin vain suurten riskien malli) mallinnettiin komponentteina, jotka olivat kytkettyinä sarjaan. Arvioidut alkutapahtumien vikaantumistaajuudet ja korjausseisokin pituudet löytyvät liitteen 2 taulukoista L2-2, L2-3, L2-4 ja L2-5. Yhdessä taulukossa on tiedot yhden vikakokonaisuuden alkutapahtumista. Vikakokonaisuuksia oli yhteensä neljä: suuret sisäiset, palot, tulvat ja muut suuret. Taulukoista löytyy lisäksi tietoja alkutapahtumista, vikataajuuden ja korjausseisokin lähteet tai arviointiperusteet sekä tiedot alkutapahtumista, joita ei huomioitu käytettävyyssmallissa ja syyt huomioimatta jättämiselle. Lisäksi taulukosta L2-3 löytyy paloille arvioidut huonetyyppien sammutusjärjestelmätodennäköisyydet.

Sammutusjärjestelmätodennäköisyydet arvioitiin palo-PRA:n huoneiden syttymistapahtumien ja niissä olevien sammutusjärjestelmien perusteella yhtälöllä (4-3). Sammutusjärjestelmätodennäköisyyksien, huonekohtaisten syttymistapahtumien ja sammutusjärjestelmien toimivuustodennäköisyyksien perusteella pystyttiin arvioimaan huonetyyppien menetystaajuus palamisen takia yhtälöllä (4-2). Suuri osa suurten riskien vikataajuuksista, muista kuin paloista, on PRA:n alkutapahtumataajuuksia.

Suurten riskien mallin ennustama käytettävyys ilman yleismallia on 97,42 % ja kun mukaan otetaan yleismallin tulokset niin mallin ennustama käyttökerroin on $97,42 \% \cdot 93,15 \% = 90,75 \%$. Vastaavasti ilman vuosihuoltoa käytettävyydeksi saadaan $97,42 \% \cdot 98,88 \% = 96,32 \%$. Taulukot 5-3 ja 5-4, ja kuvaajat 5-3 ja 5-4 tarjoavat samat tiedot, kuin yleismallin vastaavat taulukot 5-1 ja 5-2, ja kuvaajat 5-1 ja 5-2. Taulukoissa 5-3 ja 5-4 näkyy kokonaistuotantotappion jakaantuminen vikakokonaisuuksille ja tuotantotappioiden aikaisten tehojen mukaisesti. Molemmissa taulukoissa 5-3 ja 5-4 on arvot sekä tehoajolle että koko vuodelle. Kuvissa 5-3 ja 5-4 näkyy kuvaajilla sama tieto tehoajolta. Tiedot laskettiin ensin tuotantotappiokohtaisesti. Yhtälöllä (3-4) ensin kokonaiskäytettävyys ja yhtälöillä (4-5) ja (4-6) tuotantotappioiden osuudet kokonaistuotantotappiosta. Tämän jälkeen taulukoissa 5-3 ja 5-4 olevat arvot saatiin laskemalla yhteen tuotantotappiot vikakokonaisuuksittain ja tuotantotappioidenaikaisten tehojen mukaisesti. Tuotantotappiokohtaiset tulokset, tuotantotappioiden vikakokonaisuudet ja tuotantotappioidenaikaiset tehot löytyvät liitteen 2 taulukoista L2-1 ja L2-6. Tarkemmat tiedot kaikista tuotantotappioista sekä näitä koskevista analyyseistä löytyvät liitteestä 2.



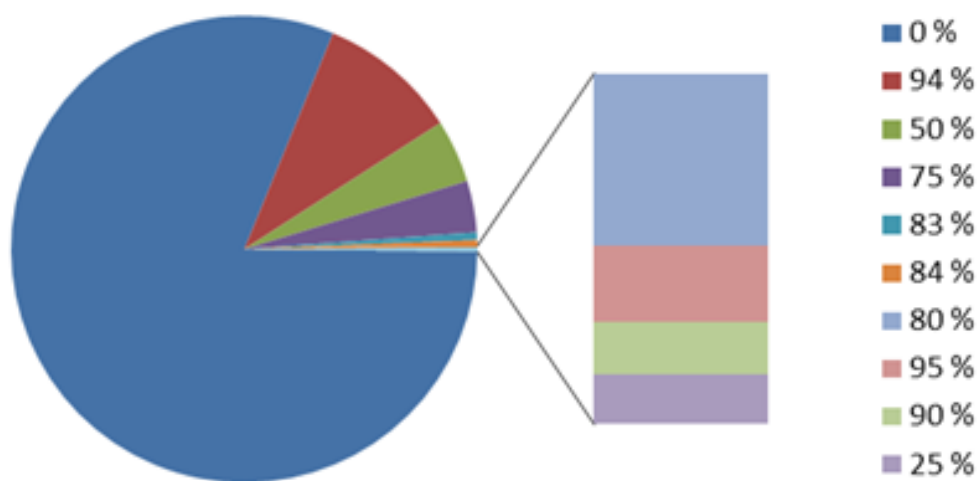
Kuva 5-3. Suurten riskien mallin tuotantotappioiden aiheuttama osuus kokonaistuotantotappioista tehoajolla.

Taulukko 5-3. Suurten riskien ja yleismallin kokonaistuotantotappioiden jakaantuminen eri tuotantotappionaikaisille tehotasoille. Taulukossa on erikseen arvot tehoajolle ja koko vuodelle.

Vikakokonaisuus	Osuus tuotantotappiosta	Osuus tehoajon tuotantotappiosta
Vuosihuolto	60,54 %	
Palot	19,92 %	50,46 %
Venytysajo	3,82 %	9,69 %
Suuret sisäiset	2,94 %	7,44 %
Muut suuret	2,70 %	6,84 %
Tulvat	2,05 %	5,20 %
YD	1,64 %	4,16 %
Tehonsäätö	1,33 %	3,36 %
RL	0,98 %	2,48 %
YS	0,92 %	2,32 %
Muut suunnitellut	0,62 %	1,57 %
YA	0,61 %	1,53 %
SP	0,53 %	1,33 %
SA	0,39 %	1,00 %
Primääripiirin I&C	0,23 %	0,59 %
Reaktori	0,20 %	0,50 %
Rakoest	0,19 %	0,47 %
Turvajärjestelmät	0,14 %	0,36 %
YP	0,13 %	0,34 %
RM	0,04 %	0,11 %
Apujärjestelmät	0,03 %	0,08 %
VC	0,03 %	0,08 %
RD/RH	0,03 %	0,07 %

Taulukko 5-4. Suurten riskien ja yleismallin kokonaistuotantotappion jakaantuminen eri tuotantotappioidenaikaisille tehotasoille. Ilmoitetaan erikseen osuudet tehoajolla ja koko vuonna.

Teho tuotantotappion aikana	Osuus tuotantotappiosta	Osuus tehoajon tuotantotappiosta
0 %	92,53 %	81,06 %
94 %	3,82 %	9,69 %
50 %	1,72 %	4,37 %
75 %	1,40 %	3,55 %
83 %	0,21 %	0,54 %
84 %	0,19 %	0,47 %
80 %	0,06 %	0,16 %
95 %	0,03 %	0,07 %
90 %	0,02 %	0,05 %
25 %	0,02 %	0,05 %



Kuva 5-4. Suurten riskien mallin tehoajonaikaisen tuotantotappion jakaantuminen eri tuotantotappioidenaikaisille tehotasoille.

Luku 6

Yhteenveto ja päätelmät

Tämä luku sisältää yhteenvedon tuloksista. Jokaisen merkittävän tuloksen jälkeen arvioidaan tuloksen ja käytettyjen menetelmien tarkkuutta ja verrataan tulosta muihin analyysihin. Luku sisältää ensin Lo1:n käytettävyyssanalyysin tulosten arvioinnin eri tilanteissa, erikseen yleismallissa ja suurten riskien mallissa, luvut 6.1 ja 6.2. Näiden jälkeen arvioidaan suurimpia yksittäisiä tuotantotappioita molemmissa malleissa, luku 6.3. Luvuissa 6.4 ja 6.5 arvioidaan kuinka tuloksia voidaan hyödyntää ja minkälainen on jatkotutkimuspotentiali. Taulukossa 6-1 näkyy mallin ennustamat käytettävyyden arvot eri tilanteissa. Taulukossa on myös vertailuarvot Loviisan ydinvoimalaitoksen historiasta tai aiemmista arvioista. Jokaisen vertailuarvon perusteet sekä arvio eron suuruudesta löytyy myöhemmin tästä luvusta.

Taulukko 6-1. Analyysin ennustamat käyttökertoimet sekä käytettävyydet eri tilanteissa ja näiden vertailuarvot Loviisan ydinvoimalaitoksen historiasta tai aiemmista arvioista.

	Käytettävyys	
	Mallin ennuste	Lo1 historia ²
Yleismalli ilman vuosihuoltoa	98,88 %	98,2 %
Yleismalli	93,15 % ³	89,4 %
Suuret riskit	97,42 %	98,41 % ⁴
Yleismalli sekä suuret riskit ilman vuosihuoltoa	96,32 %	96,0 %
Yleismalli sekä suuret riskit	90,75 % ⁵	87,20 % ⁶

² Vuosihuollon pituudessa sekä vertauksessa yleismalliin huomioidaan keskiarvot aikavälillä 1981 - 2014. Vuosihuollon vaikutus arvioidaan luvussa 2.1

³ Mallin ennustama tavanomaisen vuoden käyttökerroin

⁴ Loviisan ydinvoimalaitoksella vuonna 1980 realisoituneen yksittäisen tuotantotappion vaikutus kumulatiiviseen käyttökertoimeen aikavälillä 1977 - 2014

⁵ Mallin ennustama odotusarvoinen käyttökerroin Lo1 loppukäyttäjälle

⁶ Lo1:n käyttöhistorian kumulatiivinen käyttökerroin vuoden 2014 loppuun mennessä

6.1 Yleismalli

Yleismallin ennustama käyttökerroin kuvasi tavanomaisen vuoden käyttökerrointa. Mallin ennustama käyttökerroin ilman suuria riskejä oli 93,15 %. Loviisan ensimmäisen ydinvoimalaitosyksikön keskimääräinen käyttökerroin vuosina 2010 - 2014 oli 91 %, joten yleismallin käyttökerroin on jonkin verran optimistinen. Taulukon 6-1 vertailussa esitetään keskimääräinen käyttökerroin vuosilta 1981 - 2010, koska tältä aikaväliltä huomioitiin yleismallin vikaantumiset. Yleismallissa vuosihuollon pituus huomioitiin kuitenkin lyhyemmältä aikaväliltä ja vuosihuollon pituus on merkittävin yksittäinen tuotantotappio. Yleismalli on optimistinen ainakin seuraavista syistä:

- Vuosihuollon pituudessa huomioidaan vain polttoaineenvaihtoseisokki ja lyhyt vuosihuolto. Siinä ei huomioida Loviisan ydinvoimalaitoksen pidempiä neli- ja kahdeksanvuotisvuosihuoltoja.
- Tuotantotappioissa ei huomioida kaikkia potentiaalisia tuotantotappioita.
- Yleismallissa huomioitujen tuotantotappioiden mallinnuksen epätarkkuus.

Yleismallissa huomioitujen tuotantotappioiden mallinnuksen epätarkkuus johtuu seuraavista tekijöistä:

- Kaikki tuotantotappiot arvioitiin samalla tavalla PREB menetelmällä. Lopullisten vikaantumis- ja korjausajan jakaumien sopivuutta alkuperäiseen aineistoon ei arvioitu erikseen tapauskohtaisesti. PREB menetelmä on kuvattu luvussa 4.1.2.
- Yleismalli mallinnettiin Miriam RAM Studiolla. PREB menetelmällä saatujen tulosten siirtäminen Miriam RAM Studioon ei onnistunut ilman approksimaatiota. Miriam RAM Studio vaatii vikaantumis- ja korjaustiedot erilaisina jakaumina, kuin mitä PREB menetelmä tuottaa. PREB menetelmä tuottaa gammajakaumaestimaatit vikaantumis- ja korjaustaajuudenjakaumista. Miriam RAM Studio vaatii vikaantumis- ja korjausajanjakaumat. PREB menetelmän gammajakaumaan perustuvat taajuusjakaumat approksimoitiin eksponenttijakautuneina aikajakaumina. Tästä approksimaatiosta aiheutuneen virheen suuruutta ei ole arvioitu.

Taulukossa 6-1 näkyy myös Lo1:n historiasta saatu arvio käytettävyydelle ilman vuosihuollon vaikutusta, 98,2 %. Arvio on lähellä yleismallin käytettävyyttä ilman vuosihuoltoa, 98,88 %.

Seuraavaksi tarkastellaan vuosihuollon pituuden mallinnuksen epävarmuutta ja sen vaikutusta käyttökertoimeen. Yleismallissa vuosihuolto aiheuttaa tuotantotappioista

$(98,88 - 93,15) / (100 - 93,15) \% = 83,65 \%$, joten vuosihuollon pituus on merkittävin yksittäinen tekijä käyttökertoimessa. Loviisan ydinvoimalaitoksen vuosihuoltostrategioissa (katso luku 4.1.1) arvioidaan vuosihuollon pituuksia. Vuosihuollon pituus ilman neli- ja kahdeksanvuotisvuosihuoltoja arvioidaan 18,25 päivän mittaiseksi ja huomioiden kaikki vuosihuoltotyypit arvioksi saadaan 21,625 päivää. Ei ole tietoa, huomioiko vuosihuoltostrategiat vuosihuoltojen venymistä, joten näitä arvoja ei voi suoraan käyttää käytettävyyssmallinnuksessa ilman, että mallinnetaan myös vuosihuoltojen venyminen. Näiden pituuksien avulla voidaan kuitenkin arvioida kuinka paljon pidempi vuosihuolto olisi jos huomioidaan kaikki vuosihuoltotyypit. Kaikki vuosi- huollot huomioiden vuosihuolto on siis $21,625 - 18,25 = 3,375$ päivää pidempi. Tällai- nen tuottamaton aika laskee käyttökerrointa $3,375 / 365 = 0,92 \%$ -yksikköä. Vuosi- huollon pituus arvioidaan vuosittain tarkasti samalla, kun arvioidaan vuosihuollossa tehtävät työt ja tätä vuosihuollon arvioitua pituutta käytetään vuosittaisessa tuotan- toennusteessa. Jos vuosihuoltoa mallinnetaan myöhemmin tarkemmin käytettävyyss- analyyseissä, niin kannattaa huomioida Loviisan ydinvoimalaitoksen ammattitaito liittyen vuosihuoltoihin.

6.2 Suurten riskien malli

Suurten riskien mallin käyttökerroin kuvaa Lo1:n käyttökerrointa loppukäyttöiällä. Mallin ennustama käyttökerroin on 90,75 %. Suurten riskien mallissa vuosihuolto vas- taa $(96,32 - 90,75) / (100 - 90,75) \% = 60,22 \%$ tuotantotappioista. Vuosihuolto on edelleen suurin yksittäinen tuotantotappio, mutta sen vaikutus on pienentynyt. Lo1:n koko historian kumulatiivinen käyttökerroin on 87,2 %, joka on pienempi kuin suurten riskien mallin ennustama käyttökerroin. Malli on siis edelleen optimistinen, mikä on hyvä, kun huomioidaan, että työssä on monia käytettävyyttä yliarvioivia tekijöitä. Lo1:n historian kumulatiivista käyttökerrointa ei voi suoraan käyttää ennusteena lop- pukäyttöiän keskimääräiselle käyttökertoimelle, mutta se antaa luultavasti hyvän ver- tailukohdan. Lo1:n kumulatiivista käyttökerrointa pienentää erityisesti ensimmäisten vuosien pienet käyttökertoimet. Lo1:n käyttökertoimet olivat pienempiä aikavälillä 1977 - 1984. Tämän jälkeen käyttökertoimet ovat pysyneet hieman suurempina.

Yleismallin sekä suurten riskien mallin ennustama käytettävyyys ilman vuosihuoltoa on 96,32 %. Tätä voidaan verrata Lo1:n kumulatiiviseen käyttökertoimeen koko käyttö- historian ajalta, kun toteutuneesta käyttökertoimesta poistetaan vuosihuollon vaikutus. Tällainen historian mukainen käytettävyyys on 96,0 %. Tässä vuosihuolto huomioidaan vain vuosilta 1981 - 2014.

Vuonna 1980 Loviisan ydinvoimalaitoksella realisoitui pitkän seisokin aiheuttanut tapahtuma. Tämä on yksi esimerkki suurten käytettävyyssriskien realisoitumisesta, joiden vaikutusta kokonaiskäytettävyyteen pyrittiin tässä työssä arvioimaan. Vuoden 1980 tapahtumassa primääripiirin laitteistojen hitsausaumoissa havaittiin vaurioita ja siitä aiheutui yli puolen vuoden seisokki, yhteensä noin 221 päivää. Tämä yksittäinen suuri toteutunut käytettävyyssriski vaikutti Lo1:n kumulatiiviseen käyttökertoimeen vuoden 2014 loppuun mennessä karkeasti arvioituna $221 / (365 * 38) = 1,59$ %-yksikköä, missä 38 on Lo1:n loppukäyttöikä vuosissa vuoden 2014 lopussa.

Työn analyysissä suuret riskit pienensivät Lo1:n käyttökerrointa $93,15 - 90,75 \% = 2,4$ %-yksikköä. Tämä käyttökertoimen pienentyminen on vain jonkin verran suurempi kuin yllä esitetyn Lo1:n suurimman yksittäisen tuotantotappion vaikutus kumulatiiviseen käyttökertoimeen. Tähän yhteen realisoituneeseen suureen käytettävyyssriskiin verrattuna suurten riskien vaikutusta käyttökertoimeen ei voi pitää pessimistisenä.

Suurten riskien mallin aiheuttamaa käyttökertoimen alenemista suhteessa yleismalliin voi verrata myös analyysin (Jänkälä & Taskinen, 1991) tuloksiin. Analyysin tarkempi kuvaus on luvussa 3.2. Työssä arvioitiin uudelle VVER-1000 ydinvoimalaitosyksikölle käyttökerroin tavanomaiselle käyttövuodelle ja keskimääräinen käyttökerroin koko käyttöiälle. Työssä ero tavanomaisen vuoden ja koko käyttöiän käyttökertoimien välillä oli noin 5 %-yksikköä. Käyttökertoimen aleneminen oli siis suurempi kuin tässä diplomityössä suurten riskien vaikutus käyttökertoimeen. Suurten riskien malli on siis optimistinen verrattuna analyysiin (Jänkälä & Taskinen, 1991). Jänkälän ja Taskisen työssä ei ollut ihan vastaavaa rajanvetoa yleismalliin ja suurten riskien malliin, kuin tässä diplomityössä. Uudella ydinvoimalaitosyksiköllä ei ole omaa historiaa minkä perusteella voisi rakentaa tämän diplomityön yleismallia vastaavan tavanomaisen vuoden mallin.

Optimistisuus suurten riskien mallissa johtuu yleismallin optimistisuuden lisäksi mallin kattavuudesta. Suurten riskien malli sisältää suurista käytettävyyssriskeistä ainoastaan Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n alkutapahtumat ja joitain muita yksittäisiä PRA:n yhteydessä havaittuja suuria käytettävyyssriskejä. On olemassa myös monia sellaisia tapahtumia, jotka eivät vaaranna ydinvoimalaitoksen turvallisuutta, mutta joista voi aiheutua pitkiä seisokkeja. Tällaiset käytettävyyssriskit rajattiin pois tästä työstä.

Suurten riskien korjausaikojen epävarmuustekijöitä

Suurten riskien malliin epätarkkuutta syntyy erityisesti epätarkoista korjausajoista. Tässä arvioidaan epätarkkuuden lähteitä suurten riskien korjausajan arvioinnissa. En-

sin arvioidaan asiantuntija-arvioiden virhettä ja sen jälkeen asiantuntija-arvioissa huomioimatta jätettyjä osia.

Suurin osa suurten riskien korjausajoista on asiantuntija-arvioita ja näiden arvioiden tekoon käytettiin alle 35 asiantuntijatyötuntia⁷ kahdessa erillisessä kokouksessa joissa oli yhteensä noin 10 asiantuntijaa. Ei ole varmuutta, johtaako epätarkkuus liian optimistisiin vai epäoptimistisiin tuloksiin. Arvioita voidaan kuitenkin verrata maailmalla sattuneisiin vastaaviin tapahtumiin. Näille samoille tapahtumille asiantuntijat arvioivat pääsääntöisesti pidempiä korjausaikoja kuin tapahtumien keskimääräiset toteutuneet kestoajat. Pitää kuitenkin huomioida, että tapahtumat eivät ole identtisiä PRA:n alkutapahtumiin nähden ja usein huomioidut tapahtumat ovat lievempiä, kuin PRA:n alkutapahtuma.

Korjausajan arvioinnissa on lisäksi epävarmuustekijöitä, joiden takia korjausaikoja ei voi arvioida suoraan muiden maailmalla tapahtuneiden vastaavien tapahtumien perusteella. Lähtökohtaisesti asiantuntija-arvioita verrataan ja arvioidaan sen mukaisesti, minkälaisia tapahtumia on sattunut. Arvioituja syitä korjausaikojen eroon vastaaviin tapahtumiin nähden ovat Lo1:n loppukäyttöikä ja viranomaisvaatimukset. Lo1:n loppukäyttöikä vaikuttaa suorasti ja epäsuorasti lopputulokseen. Suorana vaikutuksena loppukäyttöikä vaikuttaa kaikkein pisimpien suurten riskien korjausaikaan. Esimerkiksi sydänvaurion jälkeen voimalaitosta ei saada enää käyttöön ja huomioitava korjausaika on suoraan verrannollinen loppukäyttöikänsä. Vikaantumistaajuuden pysyessä riippumattomana loppukäyttöiästä, loppukäyttöiän muuttaminen muuttaa suoraan sydänvauriosta aiheutuvaa epäkäytettävyyttä. Epäsuorasti loppukäyttöikä vaikuttaa korjauksen kannattavuuden kautta. Jos lähellä käyttöiän loppua tapahtuu kallista korjausta vaativa tapahtuma, niin voimalaitosta ei välttämättä korjata ja se suljetaan jo silloin lopullisesti. Yhdenkään alkutapahtuman ei arvioitu aiheuttavan pysyvää Lo1:n sulke- mista jos tapahtumasta ei seuraa sydänvauriota.

Suurissa käytettävyyssriskeissä epävarmuuksia liittyy myös viranomaisvaatimuksiin. Vaikka jonkin onnettomuuden jälkeen voimalaitos pystytään korjaamaan, niin valvova viranomainen ei välttämättä hyväksy voimalaitoksen uudelleen käyttöönottoa. Myös viranomaisvaatimuksia arvioitiin korjausaikoja arvioitaessa. Samassa yhteydessä kuitenkin arvioitiin, että viranomaisvaatimusten arvioiminen etukäteen on hankalaa.

⁷ Ei sisällä diplomityöntekijän työtunteja

6.3 Suurimmat tuotantotappiot

Vuosihuolto on suurin syy tuotantotappioihin sekä yleismallissa, että suurten riskien mallissa. Vuosihuollon vaikutus arvioitiin jo käyttökertoimien yhteydessä luvuissa 6.1 ja 6.2. Nyt keskitytään muihin suurimpiin tuotantotappioiden syihin. Vuosihuollon jälkeen suurin tuotantotappioista havaittava ryhmä on suunnitellut tuotantotappiot. Taulukossa 6-2 näkyy suunniteltujen tuotantotappioiden osuudet kaikista tuotantotappioista. Suunniteltuja tuotantotappioita ovat vuosihuollon lisäksi venytysajo, tehonsäätö, RA-varoventtiilien koestus (Rakoest) ja muut suunnitellut tuotantotappiot. Arvot taulukkoon 6-2 kerättiin laskemalla yhteen arvot luvun 5 taulukoista 5-1 ja 5-3. Suurten riskien mallissa suunnitellut tuotantotappiot vastaavat tehoajolla enää hieman yli 5 % tuotantotappioista, eivätkä ne ole enää suurin tuotantotappioiden ryhmä.

Taulukko 6-2. Suunniteltujen tuotantotappioiden osuus kaikista tuotantotappioista eri tilanteissa. Myös suunniteltujen tuotantotappioiden venymiset huomioidaan suunniteltuina tuotantotappioina.

Suunniteltujen tuotantotappioiden osuus kaikista tuotantotappioista			
Yleismalli	Yleismalli, tehoajo	Suuret riskit	Suuret riskit, tehoajo
91,85 %	50,24 %	62,67 %	5,41 %

Yksittäisistä tuotantotappioista suurten riskien palot huonetyypissä S (sähkötilat) nousivat selvästi merkittävimmiksi. Yksittäisten tuotantotappioiden vaikutus kokonaiskäytettävyyteen löytyy taulukosta L2-6 liitteessä 2. Sähkötilojen palot heikensivät käyttökerrointa yli kolminkertaisesti verrattuna seuraavaksi suurimpaan tuotantotappioon venytysajoon. Sähkötilojen palojen osuus tehoajon tuotantotappioista oli 30,51 % ja venytysajon 9,69 %. Palot ovat selvästi myös suurin tuotantotappioita aiheuttava vikakokonaisuus. Palot aiheuttavat 50,46 % tehoajon tuotantotappioista. Seuraavaksi suurin tuotantotappioiden aiheuttaja on venytysajo, joka ei kuulu minkään muun tuotantotappion kanssa samaan vikakokonaisuuteen.

Palotapahtumien käytettävyydshallinnus sisältää suurten riskien vikakokonaisuuksista suurimmat epävarmuudet. Paloissa oletetaan saman huonetyypin huoneiden korjausajat yhtä pitkiksi ja palokunnan sammutusten onnistuminen arvioidaan yhtä hyväksi joka huoneessa. Palokunnan arvioidaan estävän palon leviäminen, mutta palokunnan ei arvioida pelastavan palavaa huonetta vaan se menetetään kokonaan joitain yksittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta. Nämä poikkeukset löytyvät listattuna taulukosta L2-3 liitteestä 2.

Vikakokonaisuuksista palojen jälkeen suurimmat tuotantotappiot syntyvät muista suurten riskien vikakokonaisuuksista. Näillä on keskenään lähes yhtä suuri vaikutus kokonaisepäkäytettävyyteen. Vasta näiden jälkeen merkittävimpiä ovat yleisemmän muut tuotantotappioiden vikakokonaisuudet. Taulukosta 5-3 löytyy kaikkien vikakokonaisuuksien vaikutukset käyttökertoimeen.

Suurin osa tuotantotappioista syntyi sellaisista tuotantotappioista, joissa koko voimalaitos jouduttiin ajamaan alas. Yleisimmalla tällaisia tuotantotappioita oli 39 % tehoajolla ja 90 %, jos huomioidaan myös seisokki, taulukko 5-2. Suurten riskien mallissa yli 80 % tuotantotappioista aiheutti voimalaitoksen alasajon ja tehoajolla yli 92 %, taulukko 5-4. Seuraavaksi suurin teho tuotantotappion aikana oli 94 %, koska venytysajon arvioitiin aiheuttavan tällaisen tehonalennuksen. Seuraavaksi yleisin on 50 %, joka aiheutuu, jos toinen turpiini (tuotantotappioissa merkintä SA) ja generaattori (SP) joudutaan irrottamaan verkosta. Seuraavaksi suurin eli 75 % tuotantoteho aiheutui, kun puolet jommankumman turpiinin tehosta jouduttiin rajaamaan pois esimerkiksi yhden merivesipumpun (VC) vikaantumisen takia.

6.4 Työn tulosten hyödyntäminen

Työn tärkeimpänä tuloksena nähdään, että suurten käytettävyyseriskien arviointi onnistuu työssä käytetyillä menetelmillä ja ne tuottavat realistisia arvioita. Numeeristen tulosten käyttäminen päätöksenteon tukena vaatii kuitenkin lisäanalyysijä ja mallin tarkentamista. Työn tulosten mukaan suuret käytettävyyseriskit aiheuttavat mahdollisesti merkittäviä tuotantotappioita Lo1:n loppukäyttöaikana. Yksittäisen suuren käytettävyyseriskin realisoituminen Lo1:n loppukäyttöajalla on kuitenkin epätodennäköistä. Työn tulosten perusteella pystyy vertaamaan eri käytettävyyseriskejä ja näkee, mitkä ovat arvioiduista käytettävyyseriskeistä suurimmat ja kuinka paljon merkittävämpiä nämä ovat verrattuna muihin käytettävyyseriskeihin.

Työn tulosten perusteella palot ovat kategorisesti suurin käytettävyyseriski ja tällä perusteella paloturvallisuuteen Loviisan ydinvoimalaitoksella on syytä kiinnittää huomiota. Myös paloriskit on syytä arvioida tarkemmin ennen kuin näiden perusteella tehdään muutoksia Loviisan ydinvoimalaitoksella. Palojen käytettävyyssmallinnukseen liittyy merkittäviä epävarmuuksia. Suurimmaksi yksittäiseksi käytettävyyserikiksi vuosihuollon jälkeen nousi huonetyypin S (sähkötilat) palot. Sähkötiloina huomioidaan seuraavat Lo1:n huoneet: 1A0745, 1L0312, 1L0314, 1L0327, 1L0331, 1V0321, 1V0331, 1V0341, 1V0351, 1V0831, 1V0846 ja 1V1345.

Sähkötilojen palot alensivat ennustettua käyttökerrointa loppukäyttöajalle yli kolme kertaa enemmän kuin venytysajo. Toki venytysajo on jokavuotinen varma tuotanto-

tappio ja sähkötiloissa ei mahdollisesti pala kertaakaan Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöaikana. Sähkötila palaa ennusteen mukaan noin kerran 160 vuodessa. Jos huomioidaan Loviisan potentiaalinen kolmas ydinvoimalaitosyksikkö, niin käyttöikää tulee yksiköille yhteensä yli 150 vuotta. Tässä ajassa on jo todennäköistä, että vähintään kerran palaa sähkötiloissa. Tästä yksittäisestä palosta arvioitiin aiheutuvan kerralla enemmän tuotantotappioita, kuin venytysajo aiheuttaa 150 vuoden aikana.

Loviisan ydinvoimalaitoksen lyhyen loppukäyttöiän takia suurten riskien vaikutus jää jonkin verran pienemmäksi, kuin uudessa ydinvoimalaitoksessa tehtävässä vastaavassa analyysissä. Tästä syystä suurten riskien analyysistä saadaan enemmän hyötyä uutta ydinvoimalaitosyksikköä suunniteltaessa. Myös merkittävien uudistusten yhteydessä kannattaa huomioida suuret käytettävyyseriskit. Jos voimalaitokselle tehdään joka tapauksessa muutoksia niin samalla kannattaa huomioida näiden muutosten vaikutus suuriin käytettävyyseriskeihin. Aina kannattaa vähintään valita myös suuria käytettävyyseriskejä pienentävä vaihtoehto samanhintaisista vaihtoehdoista. Kannattaa huomioida, että suuri käytettävyyseriski ei ole välttämättä suuri sydänvaurioriski, joka huomioidaan kustannusarvioissa.

6.5 Jatkotutkimukset ja potentiaali

Suuret riskit huomioivalla käytettävyyssanalyysillä on monia jatkokehitysvaihtoehtoja. Arvioidut vaihtoehdot ovat:

1. PRA-mallin tarkempi huomioiminen käytettävyyssanalyysissä.
2. Muiden suurten käytettävyyseriskien huomioiminen.
3. Yleisen käytettävyyssmallin laajentaminen ja tarkentaminen.

Jokaisesta vaihtoehdosta esitetään joitain huomioita alla. Vaihtoehdoista kaksi ensimmäistä liittyy siis suurten riskien arvioinnin jatkamiseen ja viimeinen yleismallin kehittämiseen. Loviisan ydinvoimalaitoksen lyhyen jäljellä olevan käyttöiän kannalta parhaalta vaihtoehdolta tuntuu yleismallin kehittäminen. Jos huomioidaan potentiaalinen Loviisa 3 tai vanhempien yksiköiden mahdollinen jatko nykyisille käyttöluville, niin myös suurten riskien arvioinnista on saatavissa enemmän hyötyä. Suurten käytettävyyseriskien ja erityisesti PRA:n tarkempaa huomiointia puoltaa PRA:ssa olevan valmiin ja vuosittain päivitettävän tiedon hyödyntäminen myös käytettävyyssanalyysissä. Vastavuoroisesti suurten käytettävyyseriskien malli ja sen yhteydessä tehtävät analyysit ovat PRA:n käytettävissä.

Kustannushyötyjen näkökulmasta käytettävyyssanalyysiin olisi tärkeä liittää kustannukset. Tässä työssä kustannukset huomioitiin ainoastaan tuotantotappioina. Suurten

riskien realisoitumisen korjaamisen kustannuksia ei huomioida ollenkaan. Kiinnostavaa olisi tietää kuinka suuri osa kustannuksista tulee tuotantotappioina ja kuinka suuri osa suurten riskien korjaamisesta.

PRA-mallin tarkempi huomioiminen

PRA-mallin tarkempi huomioiminen on suoraa tämän työn jatkamista. Alla listataan PRA-mallin tarkemman huomioimisen keinoja arvioidussa tärkeysjärjestyksessä. Loppujen alkutapahtumien huomioiminen on siis arvion mukaan paras tapa jatkaa analyysiä.

- *Loppujen alkutapahtumien huomioiminen.* Muutama alkutapahtuma jäi edelleen huomioimatta, koska näille ei sopinut sama menettely kuin muihin alkutapahtumiin. Luultavasti yksi käytettävyyden kannalta tärkeä huomioimatta jäänyt alkutapahtuma on raskaan taakan pudotus.
- *Palojen huomioiminen tarkemmin.* Kehityssuuntia ovat esimerkiksi palokunnan ja muiden sammutusjärjestelmien huomioiminen ja huonetyyppien huoneiden tärkeyden arviointi. Huoneiden tärkeytenä voi pitää esimerkiksi huoneen sisältämien komponenttien turvaluokitusta ja määrää. Turvaluokiteltuja komponentteja sisältävien huoneiden palojen korjaaminen vie pidempään kuin muiden.
- *Tapahtumiin perustuvat korjausajat.* Samat tapahtumat pystytään huomioimaan korjausajassa, kuin vikaantumisajan arvioinnissa PRA:n yhteydessä. Tässä työssä tällaisia tapahtumia huomioitiin vain muutama. Kaikkein harvinaisimpia tapahtumia ei ole tapahtunut yhdessäkään ydinvoimalaitoksessa.
- *Alkutapahtumien huomioiminen eri tapahtumina kuin PRA:ssa.* Esimerkiksi tulvissa vedenpinnan korkeuden tasot on määritetty PRA:n kannalta sopivasti. Korjausajan kannalta VC1-3 pinnankorkeuksien rajoilla ei ole merkitystä. VC2 tulvan korjausaika arvioitiin VC1 tulvaa vastaavaksi VC2 tulvan alarajalla ja VC3 tulvaa vastaavaksi VC2 tulvan ylärajalla.
- *PRA:n onnistumisketjujen huomioiminen.* Tässä työssä alkutapahtumat arvioitiin pääasiassa yksittäisillä korjausajoilla. PRA:n eri onnettomuusketjuja samalle alkutapahtumalle on mahdollista arvioida myös erikseen.
- *TTKE:n huomioiminen.* TTKE poikkeamien takia Loviisan ydinvoimalaitos voidaan joutua ajamaan alas. PRA:n yhteydessä on arvioitu luotettavuudet suurelle osalle TTKE:n alaisista komponenteista ja näiden perusteella on mahdollista arvioida, kuinka suuri epäkäytettävyys aiheutuu TTKE poikkeamista. Yleismallissa ei tunnistettu merkittäviä tuotantotappioita aiheutuneeksi TTKE poikkeamista. Jos näistä arvioidaan lisäksi aiheutuvan vain lyhyitä seisokkeja,

niin näiden mallintaminen ei ole ensisijaista. Lisäksi TTKE poikkeamiin haetaan ja useimmiten myös saadaan poikkeuslupia niin ettei Loviisan ydinvoimalaitosta tarvitse ajaa alas.

Muut suuret käytettävyyssriskit

Muiden suurten käytettävyyssriskien huomioimista ei ole tämän työn yhteydessä kovin tarkasti arvioitu. Suurten käytettävyyssriskien huomioimiseen on ainakin kaksi lähestymistapaa. Ensimmäisessä lähestymistavassa arvioidaan suoraan minkälaisia riskejä Loviisan ydinvoimalaitoksella on pitkiin seisokkeihin. Loviisan ydinvoimalaitoksen henkilökunnalle esitettäviä kysymyksiä ovat esimerkiksi: Onko laitteita, joiden varaosien saaminen on erittäin hankalaa? Onko jonkin potentiaalisen vaurion korjaaminen pitkäkestoista? Onko mahdollisia tapahtumia, joista aiheutuu laajoja vaurioita? Luultavasti ainakin palot ovat laajoja vaurioita aiheuttavia tapahtumia.

Toinen suurten käytettävyyssriskien kehityssuunta on katsoa, minkälaisia pitkiä seisokkeja on maailmalla tapahtunut ja arvioida, voiko näitä samoja tapahtua Loviisan ydinvoimalaitoksella. Tällaisia valmiita raportteja pitkistä seisokeista ei tullut vastaan tämän työn yhteydessä. Tällaisia pitkiä seisokkeja voi kuitenkin paikantaa esimerkiksi IAEA:n PRIS tietokannasta. Siinä pystyy erottelemaan tapahtumat keston mukaan, ja sen avulla voi käydä läpi vaikka 100 pitkäkestoisinta seisokkia. Tarkemmat syyt näille seisokeille pitää hakea jostain muualta, esimerkiksi IRS:stä tai WANO:sta. Uudessa PRIS nettiversiossa (IAEA, 2015b) ei pysty erittelemään millä ydinvoimalaitosyksiköllä mikäkin tapahtuma on sattunut, mutta vanhemmassa vuoden 2004 versiossa (IAEA, 2004b) pystyy.

Yleinen käytettävyyssmalli

Yleinen käytettävyyssmalli on yhdistettävissä Loviisan ydinvoimalaitoksen tuotantoennusteeseen. Potentiaalisia tämän työn yhteydessä arvioituja yleismallin kehityssuuntia ovat:

- Tarkempi vuosihuollon mallinnus sisältäen epävarmuudet vuosihuollon venymiseen. Vuosihuoltoon liittyviä tuotantotappioita on arvioitu ja kerätty kootusti vuodesta 2008 lähtien. Tällaisia tuotantotappioita löytyy myös IAEA:n PRIS tietokannasta.
- Tarkempi tehoajon käytettävyyssmalli sisältäen yksityiskohtaisempia tietoja ainakin tärkeimmistä epäkäytettävyyttä aiheuttavista järjestelmistä. Tähän on mahdollista yhdistää Loviisan RCM analyysien ja muiden sopivien kunnossapidon analyysien tulokset.
- Jos huomioidaan uusi ydinvoimalaitosyksikkö, niin koko voimalaitoksen käytettävyyssanalysointia on mahdollista hyödyntää optimaalisen vuosihuoltorytmin suunnittelussa, minimoida tavanomaisen vuoden sekä koko käyttöiän tuotantotappiot ja huomioida näissä myös koko käyttöiän kunnossapidon kustannukset.

Lähdeluettelo

Ahmed, Y., Bernard-Bruls, X. & Prohaska, G., 2015. *IAEA - IRS, details*. <http://nucleus.iaea.org/Pages/irs1.aspx>. Viitattu: 27.7.2015.

Bayes, T., 1763. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, pp. 330-418.

Cadwallader, L. C., 2012. *Review of maintenance and repair times for components in technological facilities*, Idaho Falls, Idaho: Idaho National Laboratory.

Crellin, G. L., Smith, A. M., Huzdovich, J. M. & Alto, P., 1982. *A guide to generation availability evaluations and decisions. Volume 1. Principles and practices*, Palo Alto, California, USA: EPRI.

EPRI, 2003. *Reliability assessment of the Colorado generating station. 1007442*, Palo Alto, California, USA: EPRI.

EPRI, 2015. *Electric Power Research Institute*. <http://www.epri.com/Pages/Default.aspx>. Viitattu: 22.7.2015.

Eurasto, T., 2014b. *LK:n toimintakertomus 2013 ja toimintasuunnitelman toteutuminen*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Oyj, 2014. *Vuosikertomus 2013*, Espoo: Fortum Oyj.

Fortum Oyj, 2015. *History of Loviisa nuclear power plant*. <http://www.fortum.com/en/energy-production/nuclear-power/loviisa-1--2/history/Pages/default.aspx>. Viitattu: 22.7.2015.

Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, Hal S., Dunson, D. B., Vehtari, A. & Rubin, D. B., 2014. *Bayesian data analysis*. Boca Raton, Florida: CRC Press company.

Google, 2015. *Google kartat*. <http://www.google.fi>. Viitattu: 10.8.2015.

Hostikka, L., 2013. *Pääkiertopumppujen RCM-analyysin loppuraportti. LOI-K323-00218*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Hostikka, L. & Lehtinen, T., 2013. *Päämerivesipumppujen RCM-analyysin loppuraportti. LOI-K462-00027*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

- IAEA, 2002. *Cost drivers for the assessment of nuclear power plant life extension. IAEA-TECDOC-1309*, Vienna, Austria: IAEA.
- IAEA, 2004. *IAEA-TECDOC-1393. International outage coding system for nuclear power plants*, Vienna, Austria: IAEA.
- IAEA, 2004b. *PRIS on CD-ROM 2004 edition*, Vienna: IAEA.
- IAEA, 2014a. *Safety reassessment for research reactors in the light of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant*, Vienna: IAEA.
- IAEA, 2014b. *Climate change and nuclear power 2014*, Vienna: IAEA.
- IAEA, 2015a. *The PRIS public web site*. <http://www.iaea.org/pris>. Viitattu: 27.7.2015.
- IAEA, 2015b. *PRISWEB, Electronic database for registered users*. <https://prisweb.iaea.org/Home/Pris.asp>. Viitattu: 22.7.2015.
- IAEA, 2015c. *The IAEA/NEA incident reporting system (IRS)*. <http://irs.iaea.org/>. Viitattu: 22.7.2015.
- IEC, 2015. *IEC 60050 - International electrotechnical vocabulary*, Geneva, Switzerland: IEC.
- IEEE, 2007. *IEEE Std 762™-2006. IEEE standard definitions for use in reporting electric generating unit reliability, availability, and productivity*, New York, USA: IEEE.
- Jänkälä, K. E. & Vaurio, J. K., 1987. *Empirical Bayes data analysis for plant specific safety assessment*. Zurich, Switzerland, Verlag TÜV Rheinland, Köhln, pp. 281-286.
- Jänkälä, K. E. & Vaurio, J. K., 1989. *Component aging and reliability trends in Loviisa nuclear power plant*, Pittsburgh, Pennsylvania
- Jänkälä, K., Paavola, I., Laato, T., Siren, S., Hotakainen, R., Biese, M. & Kleinberg, R., 2014a. *Loviisa 2 Riskitutkimus*, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.
- Jänkälä, K., Paavola, I., Laato, T., Siren, S., Hotakainen, R., Biese, M. & Kleinberg, R., 2014b. *Loviisa 1 Riskitutkimus*, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.
- Jänkälä, K. & Taskinen, V., 1991. *VVER-91 availability analysis during preliminary design*, Helsinki, Imatran Voima Oy.

Kuopanportti, J. & Kakkonen, J., 2014. *Lataus "Lo1-38A" Loq 38. Polttoainelatauksen reaktorifysikaaliset ominaisuudet ja polttoaineen käyttäytyminen. LO1-K919-01012*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Laakso, A. & Leino, M., 2014a. *Loviisa 1 ja 2, kunnossapidon strategiat ja kunnossapitohistorian kerääminen ja hyödyntäminen*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Laakso, A. & Leino, M., 2014b. *Loviisan voimalaitoksen laitteiden kriittisyysluokittelu ja kunnossapitotehtävien määrittely*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Lahti, T., 2011. *Loviisa 1 & 2 nimellistehojen määrittely vuonna 2011. LO1-K300-00024*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Lahti, T., 2014. *Loviisan voimalaitoksen tuotantoennusteen laadinta ja siihen liittyvä raportointi*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Leino, M., 2010. *Kunnossapito-ohjelman kattavuuden ja tehokkuuden arviointi vuosi 2009*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Miriam, 2015. *Miriam RAM Studio*. www.miriamramstudio.com. Viitattu: 24.7.2015.

Modarres, M., 2006. *Risk analysis in engineering: techniques, tools, and trends*. Boca Raton, Florida: CRC Press/Taylor & Francis.

Mulvihill, R. J., Barsell, A. W., Bley, D. C., Geymlek, J. M., Johnson, D. H., Mosleh, A., Raabe, P. H., Reny, D. A. & Wheeler, D. M., 1983. *Sequoyah nuclear power plant availability and safety assessment*, Irvine, USA: EPRI.

Mättölä, H., 2013. *Loviisa 1 ja 2 käyttöyksikön vuosikertomus 2012*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Pesonen, R. & Karhula, J., 2014. *FSAR 9.6.1 Palontorjunnan yleiset suunnittelu-perusteet*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Pirinen, H., 2010. *LO1&2 FSAR, 1.2 Laitoksen yleiskuvaus (LO 1&2)*, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Ramentor, 2015. *ELMAS - Tapahtumalogiikan mallinnus ja analysointi*. <http://www.ramentor.com/etusivu/tuotteet/elmas/>. Viitattu: 7.8.2015.

Salomaa, S., Sandberg, J., Ikäheimonen, T. K., Pöllänen, R., Weltner, A., Pukkila, O., Paite, W., Nyberg, H., Marttila, O. J., Lehtinen, J. & Karvinen, H., 2004. *Säteily- ja*

ydinturvallisuus. Osa 7 - Ydinturvallisuus. Hämeenlinna: Säteilyturvakeskus, Karisto Oy:n kirjapaino.

Salonen, P. & Holmström, E., 2013. *Lo1, Lo2 Laadunvarmistuskäsikirja - 7. Kunnossapito. LK-07-00001*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Sipola, S. & Nuutinen, P., 2014. *LO1, LO2 Yhteenveto edellisestä määräaikaisesta turvallisuusarvioinnista*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Sirén, S., 2015. *Lo1 ja 2 huonetyyppikohtaisten palotaajuusarvioiden päivitys*, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Tarkiainen, S., 1990. *Luku-A8-0024. Luotettavuusohje*, Helsinki, Imatran Voima Oy.

WANO, 2010. *WANO performance indicator programme reference manual*, London, United Kingdom: WANO.

Vaurio, J. & Jänkälä, K., 2006. Evaluation and comparison of estimation methods for failure rates and probabilities. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91, pp. 209-221.

WEC, 2004. *Performance generating plant production*, London, United Kingdom: WEC.

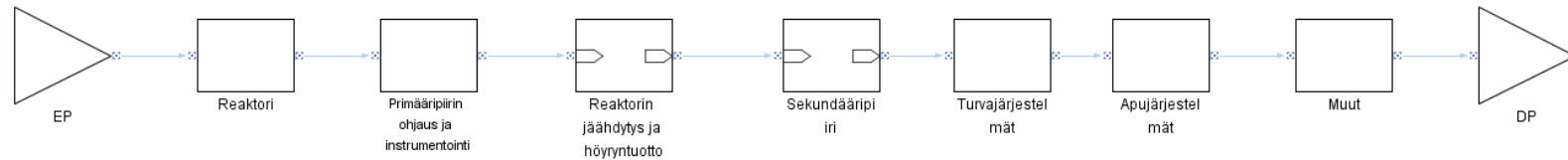
Villemeur, A., 1992. *Reliability, availability, maintainability and safety assessment. Volume 1. Methods and techniques*. Chichester: John Wiley.

WNA, 2012. *Optimized capacity: global trends and issues*, London, UK: WNA.

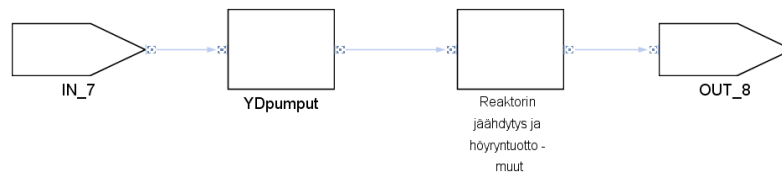
Vonka, T., 2007. *Loviisan voimalaitoksen vuosihuoltotyypit ja päätyöt*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

Liite 1

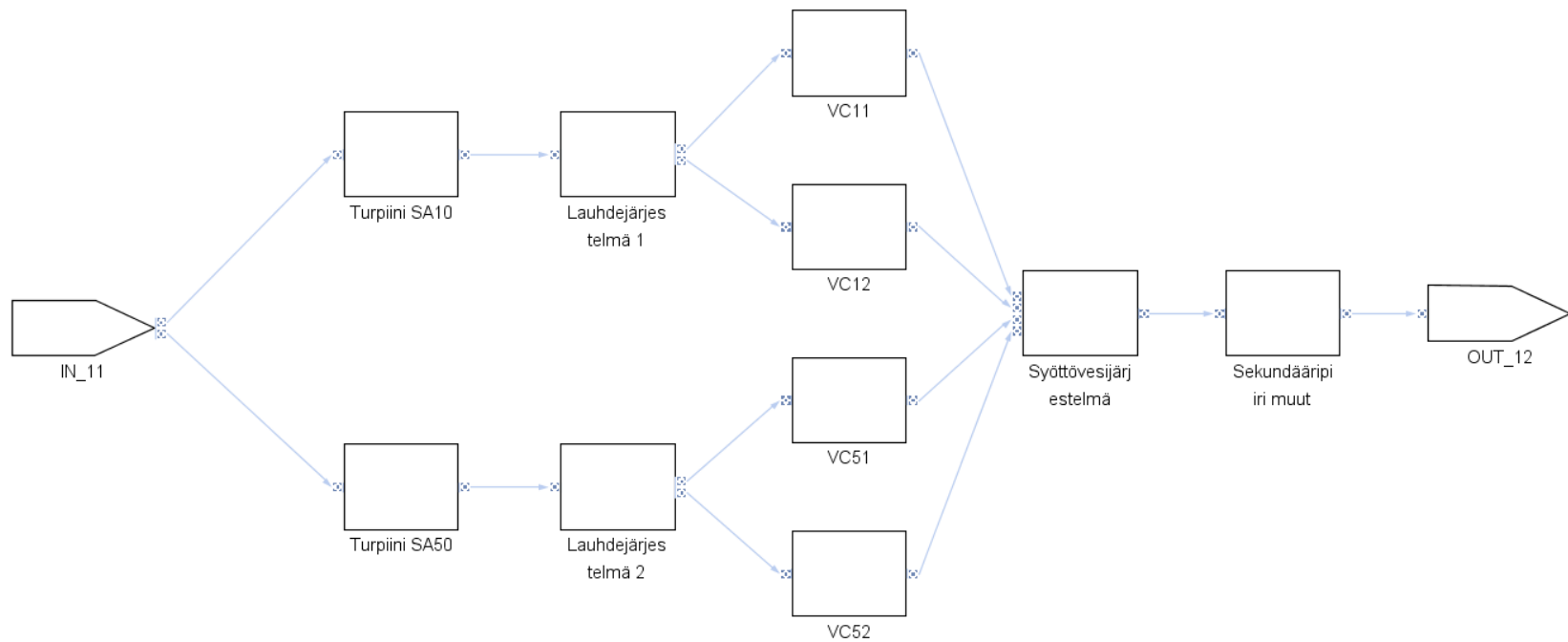
Käytettävyysmallin käytettävyyslohkokaaviot



Kuva L1-1. Yleismallin käytettävyyslohkokaaviot Miriam RAM Studiassa.



Kuva L1-2. Yleismallin käytettävyyslohkokaaviot Miriam RAM Studiassa - reaktorin jäähdytyksen ja höyryntuoton sisäinen rakenne.



Kuva L1-3. Yleismallin käytettävyyslohkokaaviot Miriam RAM Studiassa - sekundääripiirin sisäinen rakenne.

Liite 2

Käytettävyyssmallin vikaantumiset

Taulukko L2-1. Yleismallin vikaantumisten tiedot. Sisältää yleiset tiedot vikaantumisesta, vikaantumis- ja korjausajan jakaumat ja vikaantumistyyppiin.

Tuotantotappio	Tiedot	Vikaantumisajan jakauma	Keskiarvo	Aikayksikkö	Korjausajan jakauma	Keskiarvo	Aikayksikkö	Vikaantumistyyppi ⁸
apu	Apujärjestelmien viat	EXPONENTIAL	95,584998	YEARS	EXPONENTIAL	25,799993	HOURS	RUNNING
muusuunn	Muut suunnitellut tuotantotappiot	EXPONENTIAL	9,447	YEARS	EXPONENTIAL	104,827	HOURS	RUNNING
ohjauss	Reaktorin sammutus reaktorin ohjaus ja instrumentointivikojen takia	EXPONENTIAL	7,857603	YEARS	EXPONENTIAL	16,263257	HOURS	RUNNING
osateho	Reaktori osateholla. Sisältää säätösauvojen pudotuksia, suojausjärjestelmävikoja ja tahattomia primääripiirinboorauksia	EXPONENTIAL	4,101	YEARS	EXPONENTIAL	6,939	HOURS	RUNNING
pikasulku	Reaktorin pikasulku. Sisältää muita yksittäisiä syitä reaktorin sammutukseen.	EXPONENTIAL	5,817065	YEARS	EXPONENTIAL	9,330186	HOURS	RUNNING
RAkoest	RA-varoventtiilien vuosikoestus	CONSTANT	1	YEARS	EXPONENTIAL	10,15	HOURS	ELAPSED
RD	Esilämmittimien ohitus	EXPONENTIAL	3,658	YEARS	EXPONENTIAL	18,143	HOURS	RUNNING
RL	Syöttövesipumppuvika	EXPONENTIAL	4,699	YEARS	EXPONENTIAL	3,032	HOURS	RUNNING
RLsulku	Reaktorin sammutus syöttövesiongelman takia	EXPONENTIAL	9,008819	YEARS	EXPONENTIAL	78,401242	HOURS	RUNNING
RM1	SA10 turpiinin lauhdepumppuvika	EXPONENTIAL	46,692	YEARS	EXPONENTIAL	6,68	HOURS	RUNNING
RM2	SA50 turpiinin lauhdepumppuvika	EXPONENTIAL	46,692	YEARS	EXPONENTIAL	6,68	HOURS	RUNNING
RMmuu	Muut lauhdejärjestelmän viat. Erityisesti lauhteenpuhdistuslaitoksen viat	EXPONENTIAL	10,005	YEARS	EXPONENTIAL	12,29	HOURS	RUNNING
SA10	SA10 turpiiniviat. Sisältää myös päämuuntajaviat, turpiinin säätäjaviat ja vedenerotusviat korkeapaineturpiinin jälkeen	EXPONENTIAL	2,593	YEARS	EXPONENTIAL	7,624	HOURS	RUNNING
SA50	SA50 turpiiniviat. Sisältää myös päämuuntajaviat, turpiinin säätäjaviat ja vedenerotusviat korkeapaineturpiinin jälkeen	EXPONENTIAL	2,593	YEARS	EXPONENTIAL	7,624	HOURS	RUNNING

⁸ RUNNING tarkoittaa että vikaantuminen voi tapahtua vain kun kyseistä komponenttia käytetään. Yhdistelmä ELAPSED ja vakio vikaantumisaika tarkoittavat että vikaantuminen tapahtuu joka vuosi samaan aikaan.

saato	Laitoksen ajoa matalalla teholla johtuen reaktorivoista, sisältää erityisesti säätösauvavikoja ja primääripiirin tahattomia boorauksia	EXPONENTIAL	9,604	YEARS	EXPONENTIAL	471,305	HOURS	RUNNING
SArajoit	Turpiinien tehoa rajoittavia turpiinivikoja. Sisältää erityisesti turpiinin säätövikkoja, laakerivikoja	EXPONENTIAL	4,52	YEARS	EXPONENTIAL	12,367	HOURS	RUNNING
SP10	Generaattorin SP10 viat	EXPONENTIAL	14,468	YEARS	EXPONENTIAL	68,115	HOURS	RUNNING
SP50	Generaattorin SP50 viat	EXPONENTIAL	14,468	YEARS	EXPONENTIAL	68,115	HOURS	RUNNING
turvas	Reaktorin sammutus turvajärjestelmävikojen takia	EXPONENTIAL	17,2605	YEARS	EXPONENTIAL	21,99499	HOURS	RUNNING
VC11	Merivesipumpun VC11 viat	EXPONENTIAL	17,42	YEARS	EXPONENTIAL	1,876	HOURS	RUNNING
VC12	Merivesipumpun VC12 viat	EXPONENTIAL	17,42	YEARS	EXPONENTIAL	6,384	HOURS	RUNNING
VC51	Merivesipumpun VC51 viat	EXPONENTIAL	12,777	YEARS	EXPONENTIAL	3,424	HOURS	RUNNING
VC52	Merivesipumpun VC52 viat	EXPONENTIAL	17,42	YEARS	EXPONENTIAL	6,729	HOURS	RUNNING
venyt	Venytysajasta aiheutuva tuotantotappio. Venytysajot huomioitu ainoastaan vuodelta 2002.	CONSTANT	1	YEARS	EXPONENTIAL	596,773	HOURS	ELAPSED
vuosihuolto	Huomioi lyhyen vuosihuollon ja polttoaineenvaihtoseisokin. Ei huomioida 4- ja 8-vuotisvuosihuoltoja	CONSTANT	1	YEARS	CONSTANT	21,001	DAYS	ELAPSED
YAsulku	Reaktorin jäähdytyksen ja höyryntuoton muut viat, erityisesti primääriputkiston vikoja, venttiili- ja höyrystinvikoja	EXPONENTIAL	8,225983	YEARS	EXPONENTIAL	44,433583	HOURS	RUNNING
YD11	Pääkiertopumpun YD11 viat	EXPONENTIAL	4,817	YEARS	EXPONENTIAL	9,152	HOURS	RUNNING
YD1116	Pääkiertopumppujen vikojen group arvot	EXPONENTIAL	4,817	YEARS	EXPONENTIAL	9,152	HOURS	RUNNING
YD12	Pääkiertopumpun YD11 viat	EXPONENTIAL	4,817	YEARS	EXPONENTIAL	9,152	HOURS	RUNNING
YD13	Pääkiertopumpun YD11 viat	EXPONENTIAL	4,817	YEARS	EXPONENTIAL	9,152	HOURS	RUNNING
YD14	Pääkiertopumpun YD11 viat	EXPONENTIAL	4,817	YEARS	EXPONENTIAL	9,152	HOURS	RUNNING
YD15	Pääkiertopumpun YD11 viat	EXPONENTIAL	4,817	YEARS	EXPONENTIAL	9,152	HOURS	RUNNING
YD16	Pääkiertopumpun YD11 viat	EXPONENTIAL	4,817	YEARS	EXPONENTIAL	9,152	HOURS	RUNNING
YDsulku	Reaktorin sammutus pääkiertopumppuvikojen takia	EXPONENTIAL	15,199745	YEARS	EXPONENTIAL	208,048134	HOURS	RUNNING
YPsulku	Reaktorin sammutus paineistinvikojen takia	EXPONENTIAL	22,611627	YEARS	EXPONENTIAL	26,362479	HOURS	RUNNING
YSSulku	Säätösauvojen ja niiden ohjauksen viat	EXPONENTIAL	7,037758	YEARS	EXPONENTIAL	57,802132	HOURS	RUNNING

Taulukko L2-2. Tuotantotappioiden tiedot - suuret sisäiset. Sisältää tuotantotappion yleiset tiedot, keskimääräiset korjaus- ja vikaantumisaajat ja lähteen keskimääräisille korjaus- ja vikaantumisajoille sekä tiedon huomiointitavasta. Tässä listataan myös alkutapahtumat joita ei huomioida ja huomiointi -kohdassa ilmoitetaan syy.

Jäähdytteenmenetystapahtumat							
Alku-tapahtuma	Tietoja alkutapahtumasta	Korjausseinokin pituus	Korjaus-seisokin pituus (a)	Huomiointi	Tehoajan vikataajuus	Seisokin vikataajuus	Vikataajuuden lähde
PLOCA	Verrattuna MLOCAan molemmat hätäisävesijärjestelmän redundanssit toimivat	PRA: 3 kk 10% painotus; Loviisa 1 v 90% painotus	0,93	kyllä	2,66E-04	1,10E-04	RS ⁹
PTS	Reaktoripaineastian vuodon oletetaan johtavan suoraan sydänvaurioon, koska vuotoa ei pystytä kompensoimaan	Ydinvoimalaitoksen loppukäyttöikä	-	Sydänvaurio	0	0	-
SLB	Sisältää alkutapahtumat: ILSLOUT, ILSLBOUT, ILSLBIN. Pienet höyryvuodot huomioidaan yleismallissa. LSLBIN vaarana jäälauhduttimen sulaminen. Arvioidaan myöhemmin erikseen.	(3-7 päivää) ¹⁰	0	kyllä	0	0	-
DROP	DROP alkutapahtuma sisältää kolme tapahtumaa: IDROP25, IDROP25, IDROP25. Sisältää DROP tapahtumat myös muista alkutapahtumista. Arvioidaan myöhemmin erikseen.	(1 vuosi) ²	1,00	kyllä	0	0	-
RT	Reaktorin pikasulku -alkutapahtuma ei vastaa yleismallissa reaktorin pikasulkuun kerättyä vikadataa. PRA-mallissa on luokiteltu RT vioiksi käytettävyyden kannalta hyvin erilaisia vikoja.	-	-	Yleismalli	0	0	-
LMFW	Sisältää myös VC ja RM järjestelmien menetykset. "Syöttöveden menetys ennen höyrystimiä"	-	-	Yleismalli	0	0	-
LFW	Sisältää syöttövesivuotoja sekä raskaan taakan pudotuksen. "Syöttöveden menetys höyrystimen jälkeen", "tuorehöyryn menetys"	-	-	Yleismalli	0	0	-
TLFW	Pää- ja hätäsyöttöveden menetys. PRA:ssa edellytetään varahätäsyöttöveden toimintaa.	-	-	Yleismalli	0	0	-
PLFW	Kuten TLFW mutta menetetään vain toinen redundanssi. Vain seisokkitiloissa.	-	-	Yleismalli	0	0	-

⁹ RS: Alkutapahtumataajuudet laskettu RiskSpectrum ohjelmalla Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA-mallista PSA14.

¹⁰ Arvion mukaan merkittävä käytettävyyseriski. Arvioidaan myöhemmin.

LOOP	Korjausaika-arvioita PRA-mallissa. Arvioidaan myöhemmin erikseen.	(121 h) ²	1,39E-02	kyllä	1,11E-03	4,60E-04	AT ¹¹
PLSW (TLSW)	TLSW vain seisokkitiloissa	PRIS: 395,08 h ¹² painotus 10%; Loviisa 2 kk painotus 90%	1,55E-01	kyllä	4,16E-03	1,18E-04	RS
LIRV	Käytettävyyssmallin LIRV alkutapahtumassa UV25 jäähdytys menetetty, varajäähdytysjärjestelmät edelleen käytössä.	PRA: 8 viikkoa painotus 10%; Loviisa 1 kk painotus 90%	9,04E-02	kyllä	6,11E-03	1,86E-03	RS
LDCP	Laitoksen hallinta oletetaan menetetyksi. Huomioidaan ainoastaan sähkönmienetyksenä ja korjausaika sähkönsyötön palautuksesta	122 tuntia ¹³	1,39E-02	kyllä	7,00E-07	0	AT
ATWS	Reaktorin pikasulkuvaateen yhteydessä tapahtuva reaktorin sammutuksen epäonnistuminen	4 viikkoa	7,69E-02	kyllä	4,09E-05	2,28E-05	RS
YB	Riittävän iso höyryvuoto reaktorirakennuksen kellaritiloihin aiheuttaa turvallisuudelle tärkeitä lähettimiä sisältävien instrumenttihuoneiden lämpötilan nousun yli mitoitusperusteiden	2 viikkoa	3,85E-02	kyllä	6,00E-06	5,53E-08	AT
LOP		IAEA: 121,61 h ¹⁴ painotus 10%; Loviisa 1 viikko painotus 90%	1,87E-02	kyllä	1,05E-02	0	RS
Reaktiivisuusonnettomuudet							
XXSLOCA	Primääripiirin kompensoitavissa olevat vuodot 0,5 - 5 kg/s. XXSLOCA arvioidaan XSLOCAa vastaavaksi käytettävyyden kannalta.	PRA: 2 viikkoa painotus 10%; Loviisa 2 viikkoa painotus 90%	3,85E-02	kyllä	5,46E-03	1,17E-04	AT
XSLOCA	Primääripiirin vuoto 5 - 20 kg/s. Edellytetään lämmönsiirtoa höyrystimien kautta ja hätälisävesijärjestelmän toimintaa. Ei edellytetä suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmän toimintaa. Yhdessä SLOCA:n kanssa sisältää PCP tiivistevuodot häiriötapahtumien seurauksena.	PRA: 3 kk; IAEA data 16,8 d ¹⁵ painotus 50%; Loviisa 6 kk painotus 50%	0,27	kyllä	3,33E-04	3,65E-04	AT

¹¹ AT: Vikataajuudet Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n loppuraportin alkutapahtumataajuustaulukosta (Jänkälä, et al., 2014b).

¹² PRIS: 13.04 Component cooling system (in Reactor Auxiliary Systems)

¹³ PRIS: 42.00 Electrical Power Supply Systems

¹⁴ PRIS: 42.00 Electrical Power Supply Systems

¹⁵ Korjausajassa huomioidaan samat tapahtumat tai onnettomuudet, jotka huomioidaan alkutapahtumataajuuden laskennassa. Kaikille tapahtumille ei löydy korjausaikaa IAEA:lta.

SLOCA	Primääripiirin vuoto, reikä alle 5 cm ² ja yli 20 kg/s. Sydämen jäähdytys turvataan hätäisävesijärjestelmän avulla. Jälleenkierron lattiakaivojen tukkeutuminen epätodennäköisempää kuin suurissa vuotoissa. Sisältää PCP tiivistevuodot häiriötapauksien seurauksena.	PRA: 3 kk; IAEA data 5,17 d ¹⁶ painotus 50%; Loviisa 1 vuosi painotus 50%	0,51	kyllä	9,38E-05	3,23E-04	AT
MLOCA	Vuotopinta-ala 42 - 140 cm ² . Sydämen jäähdytys turvataan hätäisävesijärjestelmän avulla. Ei dataa PWR laitoksilta.	1 vuosi	1,00	kyllä	5,84E-06	3,46E-07	AT
LLOCA	Vuotoala 140 - 420 cm ² . Edellytetään akkusyöttöä sekä ylä- että alatilaa ja hätäjäähdytysjärjestelmän toimintaa sydämen jäähdyttämiseksi. Lisäksi ruiskutusjärjestelmän ja jäälauhduttimen toimintaa edellytetään suojarakennuksesta tapahtuvan lämmönsiirron onnistumiseksi. Ei dataa PWR laitoksilta	4 vuotta	4	kyllä	9,68E-06	1,21E-07	AT
XLLOCA	Vuotoala yli 420 cm ² . Suuren vuodon vaatimusten lisäksi edellytetään kahden hätäjäähdytyspumpun toimintaa vuodon alkuvaiheessa. Suojarakennuksen lattiakaivojen suodattimien tukkeutuminen on todennäköisempää erittäin suuressa vuodossa. Ei dataa PWR laitoksilta.	4 vuotta	4	kyllä	2,42E-06	3,42E-08	AT
ALOCA	Suuri vuoto akkulinjassa. Menetetään yksi akku ja toinen hätäjäähdytysjärjestelmän linja. Suuressa vuodossa edellytetään akkusyöttöä joista käytössä nyt vain toinen.	4 vuotta	4	kyllä	1,00E-06	5,28E-09	AT
SGTR	Höyrystimen jäähdytteenmenetystapahtuma. Primääripiirin vettä vuotaa sekundääripiiriin. Jos primääripuolen eristys ei onnistu, mahdollista laskea primääripaine niin että höyrystimen varoventtiili sulkeutuu.	50,9 päivää ¹⁷	1,40E-01	kyllä	1,14E-03	1,20E-04	AT

¹⁶ Korjausajassa huomioidaan samat tapahtumat tai onnettomuudet, jotka huomioidaan alkutapahtumataajuuden laskennassa. Kaikille tapahtumille ei löydy korjausaikaa IAEA:lta.

¹⁷ Korjausajassa huomioidaan samat tapahtumat tai onnettomuudet, jotka huomioidaan alkutapahtumataajuuden laskennassa. Kaikille tapahtumille ei löydy korjausaikaa IAEA:lta.

MSGTR	Höyrystimen jäähdytteenmenetystapahtuma. Primääripiirin vettä vuotaa sekundääripiiriin. Primääripuolen painetta pitää laskea jos eristys primääripuolelta ei onnistu.	102 päivää ¹⁸	2,79E-01	kyllä	5,70E-05	1,17E-05	AT
LSGTR	Höyrystimen jäähdytteenmenetystapahtuma. Primääripiirin vettä vuotaa sekundääripiiriin. Primääripuolen eristystä ei ehditä tekemään riittävän ajoissa	1 vuosi	1,00	kyllä	2,85E-05	5,85E-06	AT
LRLOCA	Oletetaan johtavan suojarakennusvaurioon ja sen seurauksena edelleen sydänvaurioon. Alkutahtuma-taajuus vastaa tapahtuman sydänvauriotaajuutta	Ydinvoimalaitoksen loppu-käyttöikä		Sydänvaurio	0	0	-
VLOCA	Vuotokoko yli 5 kg/s. Suojarakennuksen ulkopuolisessa vuodossa edellytetään sydänvaurion estämiseksi vuodon erotusta, joka tapahtuu automaattisesti paineistimen pinnasta tulevasta signaalista. VLOCA ja SVLOCA oletetaan vastaaviksi käytettävyyseriskin kannalta koska VLOCA:ssa toimii automaattinen erotus.	8 viikkoa	1,54E-01	kyllä	2,66E-07	0	RS
SVLOCA	Vuotokoko 1,5-5 kg/s. Kompensoitavia suojarakennuksen ulkopuolisia vuotoja. Arvion mukaan vuotohuoneen instrumentointiin tulee nopeasti vikoja ja noin tunnin kuluttua kaikki rengastilan instrumentointitilat menetetään [PRA CH2 p.55]. VLOCA ja SVLOCA oletetaan vastaaviksi käytettävyyseriskin kannalta koska VLOCA:ssa toimii automaattinen erotus.	8 viikkoa	1,54E-01	kyllä	2,66E-07	0	RS
XSVLOCA	Vuoto pienempi kuin 1,5 kg/s. Voivat aiheuttaa lähetinhuoneen lämpötilan nousun [PRA CH2 p.57]. XSVLOCA:n aiheuttama PCPLOCA huomioidaan jo PCPLOCA taajuudessa. Alle 0,1 % XSVLOCA tapahtumista arvioitu aiheuttavan PCPLOCA:n [PCPLOCA välilehti]	2 viikkoa	3,85E-02	kyllä	5,98E-05	0	AT
UCLOCA	Oletetaan johtavan suojarakennusvaurioon ja sen seurauksena edelleen sydänvaurioon. Alkutahtuma-taajuus vastaa tapahtuman sydänvauriotaajuutta	Ydinvoimalaitoksen loppu-käyttöikä		Sydänvaurio	0	0	-

¹⁸ Korjausaika arvioidaan kaksinkertaiseksi SGTR alkutahtumaan nähden.

PCPLOCA	Vuoto vastaa (X)SVLOCAa. Tämän tapahtuman ilmene- mistaaajuus on saatu muiden alkutapahtumien seurauk- sena PRA onnistumisketjuissa. Alkutapahtumataajuus- dessa ei huomioida (S)VLOCAa.	8 viikkoa	1,54E-01	kyllä	3,54E-04	1,11E-06	RS
Reaktiivisuusunnettomuudet							
IPCPSTOP1P		-	-	Yleismalli/Reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
IPCPSTOP6P	PCP pysähtymiset yleismallissa. Reaktiivisuusunnetto- muuksia ei huomioida käytettävyydessä.	-	-	Yleismalli/Reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
IPCPSTOP5P	PCP pysähtymiset yleismallissa. Reaktiivisuusunnetto- muuksia ei huomioida käytettävyydessä.	-	-	Yleismalli/Reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
IPCPSTOP3P	PCP pysähtymiset yleismallissa. Reaktiivisuusunnetto- muuksia ei huomioida käytettävyydessä.	-	-	Yleismalli/Reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
ILOCA	Primääripiirin vuoto reaktiivisuusunnettomuutena. Alkutapahtumataajuudessa huomioidaan kaikki primää- ripiirin vuodot.	-	-	Ei, reaktiivisuus- alku- tapahtuma	0	0	-
Häiriötapahtumat, vain seisokissa							
PLEW	Sisältää myös mm. syöttövesivuotoja, UW23 ja VG menetyksen ja raskaan taakan pudotuksen. DROP tapahtumille oma yhteinen arvio myöhemmin.	-	-	Ei, vain seisokissa ja nopea korjata	0	0	-
TLEW	Sisältää myös mm. syöttövesivuotoja, UW23 ja VG menetyksen ja raskaan taakan pudotuksen. DROP tapahtumille oma yhteinen arvio myöhemmin.	-	-	Ei, vain seisokissa ja nopea korjata	0	0	-
PLRR	Menetetään toinen jälkilämmönpoistolinjoista. Sisältää mm. RR menetys, UW23, syöttövesitankkivuodot, raskaan taakan pudotukset, välipiirin menetyksen ja höyryputkien vuotoja. DROP tapahtumille oma yhteinen arvio myöhemmin.	-	-	Ei, vain seisokissa ja nopea korjata	0	0	-
TLRR	Menetetään molemmat jälkilämmönpoistolinjoista. DROP tapahtumille oma yhteinen arvio myöhemmin.	-	-	Ei, vain seisokissa ja nopea korjata	0	0	-

TLHR	Menetetään sekä normaali jälkilämmönpoisto että varajälkilämmönpoisto. RR: RR91/92D01; varaRR: RR30/40D01. RR korvaa sekundääripiirin seisokissa. Osittain samoja alustavia alkutapahtumia kuin muissakin jälkilämmönpoiston menetyksissä. DROP tapahtumille oma yhteinen arvio myöhemmin.	-	-	Ei, vain seisokissa ja nopea korjata	0	0	-
Polttoaine-vaurio	Polttoaineen mekaaninen vaurioituminen esim. polttoaineen pudotuksissa siirron yhteydessä. Lievempi tapahtuma kuin raskaan taakan pudotus.	106 tuntia ¹⁹	-	Ei, vain seisokissa ja nopea korjata	0	0	-
Jäähdytteenmenetystapahtumat, vain seisokissa							
SMLOCA	Vuotoala 5 - 42 cm ² . Erona MLOCA:an seisokissa vaaditaan primääripiirin paineenlaskua hätäjäähdytysjärjestelmän toiminta-alueelle. Ei dataa PWR laitoksilta.	8 viikkoa	1,54E-01	kyllä	5,25E-05	1,29E-05	AT
LEAK	SMLOCA ja sitä suuremmat (vuotoala yli 5 cm ²) primääripiirin vuodot kylmäseisokissa ja latausseisokissa. Primääripiirin paineenlaskua ei tarvita. Huomioidaan vuodot ilman eristysmahdollisuutta sekä putkien murtotumat.	8 viikkoa	1,54E-01	Kyllä	0	9,67E-05	AT
DRAIN	Virheellinen vesitys erotettu kylmien vakiotilojen primääripiirin vuodosta LEAK. Voi aiheuttaa luonnonkierroksen menetyksen	-	-	Ei, vain seisokissa ja nopea korjata	0	0	-
PRISE	Höyrystinvuotoja. Primääripiirin vettä vuotaa sekundääripiiriin. Ainoastaan kuumaseisokissa. Sisältää kaikki vuotokoot, suurempi kuin SGTR	-	-	Ei, sisältyy muihin	0	0	-
Reaktiivisuusunnettomuudet, vain seisokissa							
PCPSTOP	Pääkiertopumppujen pysähtyminen ei/ja yhden kierto- piiriin erotus	-	-	Yleismalli/reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-

¹⁹ PRIS: 11.02 Reactor core (including fuel assemblies)

PCPSTART	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin. Käynnistetty PCP saattaa olla täynnä puhdasta vettä joka alentaa reaktorissa reaktiivisuutta	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
NATSTART	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
THSTART	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin, TH	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
TJSTART	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin, TJ	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
THACCU	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin, TH-akku	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
TESTART	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin. TE poistaa, puhdas mahdollisesti TK/TC:stä	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
TKSTART	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin, TK	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
NATSTOP	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-
TFLEAK	Aiheeton puhtaan veden syöttö primääripiiriin, TF	-	-	Ei, reaktiivisuus- alkutapahtuma	0	0	-

Taulukko L2-3. Tuotantotappioiden tiedot - palot. Sisältää tarvittaessa lisätietoja tuotantotappion huomioimisesta, keskimääräiset korjaus- ja vikaantumisaajat ja lähteen keskimääräisille korjaus- ja vikaantumisajoille. Paloalkutapahtumista huomioidaan kaikkien huonetyyppien palot.

Huone- tyyppi	Syttymis- taajuus huone- tyypissä (1/a) ²⁰	Korjausaika	PRA huonetyyppien sammutusjärjestelmä- todennäköisyydet			Lisätiedot	Korjaus- aika (a)
			Sprinklerit		Palokunta		
			Automaattinen	Manuaalinen			
A	6,55E-03	PRA: 2 kk paino- tus 10%; Loviisa 6 kk painotus 90%	15,09 %	0,00 %	84,91 %	Huonetyypin A turvaluokitellut huoneet mahdollista huomioida erikseen. Turva- luokitelluille huoneille arvioidaan korjausaika 1 vuosi. Muille huonetyypin huoneille arvioidaan 6 kuukauden korjausaika (Loviisa). Turvaluokitusta ei huomioida tässä työssä.	0,467
B	6,31E-04	PRA: 2 kk paino- tus 10%; Loviisa 2 kk painotus 90%	26,87 %	0,00 %	73,13 %		0,167
CT	6,93E-04	2 kk	0,00 %	53,33 %	46,67 %	Kuivamuuntajien paloja ei huomioida. Arvion mukaan kaikilla öljykäyttöisillä muun- tajilla on sprinklerijärjestelmä. PRA-mallissa laboratoriorakennuksen CT muuntajat tulkitaan öljykäyttöisiksi muuntajiksi eikä näille ole merkitty sprinklerijärjestelmää FSAR:ssa.	0,167
D	2,96E-03	PRA: 6 kk paino- tus 10%; Loviisa 2 kk painotus 90%	100,00 %	0,00 %	0,00 %	Korjausajassa on arvioitu että vaurioituvien komponenttien hankkiminen kestää pitkään	0,200
DS	6,44E-04	4 kk	100,00 %	0,00 %	0,00 %		0,333
E	1,69E-03	PRA: 12 kk paino- tus 10%; Loviisa 24 kk painotus 90%	0,00 %	0,00 %	100,00 %	Korjausajassa on arvioitu että vaurioituvien komponenttien hankkiminen kestää pitkään	1,900
K	4,76E-04	2 kk	61,19 %	33,58 %	5,22 %		0,167
M	3,97E-03	2 kk	95,45 %	0,00 %	4,55 %		0,167
PCP	2,71E-04	12 kk	0,00 %	100,00 %	0,00 %		1,000
PV	3,09E-04	2 kk	0,00 %	0,00 %	100,00 %	Päävalvomossa oletetaan aina olevan henkilökuntaa paikalla ja alkusammutustoi- mien takia palojen vauriot jäävät pieniksi	0,167

²⁰ Kaikkia muut syttymistaajuudet paitsi TM lähteestä (Sirén, 2015).

Q	6,63E-04	1 kk	0,00 %	0,00 %	100,00 %	Hallitsematon palo kytkinkentällä. Arvioidaan että koko kytkinkenttä pitää irrottaa verkosta sammutustoimien ajaksi ja syttymislähteen ympäristöön tulee palovaurioita sekä vesivaurioita sammutustoimista.	0,083
R	1,90E-04	6 kk	0,00 %	19,86 %	80,14 %		0,500
S	6,34E-03	PRA: 2 kk painotus 10%; Loviisa 24 kk painotus 90%	0,00 %	0,00 %	100,00 %		1,817
T-RC	1,60E-03	2 kk	100,00 %	0,00 %	0,00 %	Syöttövesialueen RC-hydrauliikkaöljypalot erotettu huonetyypin T paloista. RC hydrauliikalla kaksinkertainen sprinklerijärjestelmä: kohdesuojaus ja syöttövesialueen yleisprinklaus. Molempien järjestelmien toimiessa palon seuraukset arvioitu pieniksi ja niiden arvioidaan kuuluvan RC komponenttien vikataajuuteen. Jos yleisprinklaus ei toimi, palon arvioidaan johtavan RA-varoventtiilien vioittumiseen ja edelleen sydänvaurioon. Ainoa käytettävyyksmallissa huomioitu tilanne: jos yleisprinklaus toimii mutta kohdesuojaus ei toimi, palosta arvioidaan aiheutuvan vahinkoja syttymislähteen ympäristöön, mutta koko syöttövesialuetta ei menetetä. Käytettävyyksmallinnus eroaa edelleen PRA-mallinnuksesta.	0,167
T-muut	2,48E-02	PRA: 1 kk painotus 10%; Loviisa 3 viikkoa painotus 90%	100,00 %	0,00 %	0,00 %	Muut turbiinisalin ja syöttövesialueen laite- ja kaapelipalot. Ei sisällä RC öljypaloja, eikä turpiinin ja generaattorin paloja.	0,060
TB1	1,52E-03	PRA: 12 kk mutta arvioitiin eri asiaa; Loviisa 6 kk painotus 100%	0,00 %	100,00 %	0,00 %	Turpiinien öljypalot arvioidaan kuuluvan yleisiin turpiinivikoihin jos sprinklaus toimii. Jos sprinklaus ei toimi niin normaalia laajemmat vauriot turpiinille, sen ympäristölle ja lähellä olevat kaapelitunnelit vaurioituvat (1 - 3 vaurioituvaa kaapelitunnelia). Turpiinin öljypaloissa palon ei oleteta leviävän turpiinilta. Ensimmäinen turpiini saadaan käyttöön huomattavasti nopeammin kuin toinen turpiini.	0,500
TB2	1,52E-03	Loviisa: 3 vuotta -->3-0,5=2,5v 50% teholla; -->efektiivinen korjausaika 100% teholla 2,5/2=1,25v	0,00 %	100,00 %	0,00 %	Turpiinien öljypalo, vastaava kuin TB1, mutta nyt kyseessä palaneen turpiinin käyttöönottoaika. Ensimmäisen turpiinin käyttöönoton jälkeen voimalaitosta ajetaan 50% teholla kunnes molemmat turpiinit saadaan käyttöön.	1,250
TG1	1,51E-03	PRA: 12 kk mutta arvioitiin eri asiaa; Loviisa 6 kk painotus 100%	0,00 %	100,00 %	0,00 %	Generaattorien öljy- ja vetypalot arvioidaan kuuluvan yleisiin generaattorivikoihin jos sprinklaus toimii. Jos sprinklaus ei toimi niin lämmöstä aiheutuu laajemmat vauriot generaattorille, sen ympäristölle ja lähellä oleville kaapelitunneleille. Palon ei oleteta leviävän generaattorilta.	0,500

TG2	1,51E-03	Loviisa: 3 vuotta -->3-0,5=2,5v 50% teholla; -->efektiivinen epäkäytettävyys 100% teholla 2,5/2=1,25v	0,00 %	100,00 %	0,00 %	Generaattorien öljy- ja vetytalo, vastaava kuin TG1, mutta nyt kyseessä palaneen generaattorin käyttöönottoaika. Ensimmäisen generaattorin käyttöönoton jälkeen voimalaitosta ajetaan 50% teholla kunnes molemmat generaattorit saadaan käyttöön.	1,250
TM	2,50E-04 ²¹	IAEA data: 3,19 ²² kk painotus 50%; Loviisa loppu- käyttöikä paino- tus 50%	0,00 %	0,00 %	100,00 %	Turpiinivaurioissa (TM) ei huomioida sprinklereiden vaikutusta. TM palot sisältävät laajat öljypalot turpiinirakennuksessa. Osa näistä paloista pystytään arvioiden mukaan sammuttamaan sprinklerijärjestelmillä	3,197

Taulukko L2-4. Tuotantotappioiden tiedot - tulvat. Sisältää tuotantotappion yleiset tiedot, keskimääräiset korjaus- ja vikaantumisaajat ja lähteen keskimääräisille korjaus- ja vikaantumisaajoille sekä tiedon huomiointitavasta. Tässä listataan myös alkutapahtumat joita ei huomioida ja huomiointi -kohdassa ilmoitetaan syy.

Alkutapahtuma	Tietoja alkutapahtumasta	Korjaus- seisokin pituus	korjaus- seisokki (a)	Huomiointi	Teho- ajon vika- taajuus (1/a)	Seisokin vika- taajuus (1/a)	Vikataa- juuden lähde
VFRFLOOD	VF-putken murtuma tulvakynnyksen takana voi aiheuttaa meriveden leviämisen reaktorirakennukseen. Reaktorirakennuksessa veden alle jäävät molemmat hätäjähdytyspumppuhuoneet ja pääkiertopumppujen tiivistevesijärjestelmä.	PRA: 1 vuosi painotus 10%; Loviisa: 1 vuosi painotus 90%	1	Kyllä	4,86E-05	1,21E-07	AT
VFFLOOD	Sivumerivesipiirin (VF) putken murtuma RV-pumppuhuoneessa tai VF:n vuotamisen aiheuttavaa putkimurtumaa (VC, VF), mikä johtaa VC2FLOOD vastaavaan tulvaan.	2 kuukautta	0,167	Kyllä	3,52E-05	4,97E-07	RS
THFLOOD	TH/TJ/TQ/TG-putken murtuma, jossa TH-tankin vesi tulvii hätäjähdytyspumppuhuoneisiin ja lisäksi pääkiertopumppujen tiivistevesijärjestelmä jää veden alle.	1 vuosi	1	Kyllä	2,19E-06	4,97E-09	RS

²¹ Vikataajuudet Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n loppuraportin alkutapahtumataajuustaulukosta (Jänkälä, et al., 2014b)

²² IAEA:n korjausajassa huomioidaan samat tapahtumat tai onnettomuudet, jotka huomioidaan alkutapahtumataajuuden laskennassa. Kaikille tapahtumille ei löydy korjausaikaa IAEA:lta.

UJFLOOD	UJ-putken murtuma valvomorakennuksen kaapelitiloissa tasolla +11,7. Käytettävyyssmallissa alkutapahtumataajuudesta huomioidaan vain osa. Käytettävyyssmallissa huomioidaan tulvaveden keräytyminen kaapelitilan lattialle ja lattian kuormitusrajan ylittyminen	1,5 vuotta	1,5	Kyllä	7,32E-06	2,98E-07	RS
TDFLOOD	Puhtaan lauhteen varastosäiliöiden (TD50) murtuminen johtaa veden virtaamiseen puhtaan lauhteen varastosäiliöalueelle ja varahätäsyöttö-vesipumppaamoon	2 viikkoa	0,038	Kyllä	2,37E-04	7,26E-07	AT
RVFLOOD	Laitoslisävesiputken murtuman seurauksena on RV-pumppujen jääminen tulvan alle ja hätäsyöttöveden menetys. RV pumppujen menetys aiheuttaa RR pumppujen menetyksen (useiden tuntien kuluttua RV pumppujen laukeamisesta)	4 viikkoa	0,077	Kyllä	1,56E-04	2,14E-06	AT
UHFLOOD	Alkutapahtumataajuus = 0 tehoajolla sekä seisokissa. Alkutapahtumaa ei huomioida PRA-mallissa, mutta voi olla merkittävä käytettävyyden kannalta.	-	-	Ei huomioida, FR=0	0	0	-
RLFLOOD	Suuri vuoto syöttövesisäiliötasolla +19,8. Pääsyöttöveden, hätäsyöttöveden ja RR järjestelmän menetykset.	2 viikkoa	0,038	Kyllä	1,23E-04	1,20E-06	AT
IRLFLOODCFK	Suuri vuoto syöttövesisäiliötasolla +19,8. Tulva vaurioittaa valvomotilojen katon ja sen kautta valvomotiloja.	Ydinvoimalaitoksen loppukäyttöikä	6,13 ²³	Kyllä	1,39E-06	1,36E-08	AT
VC1FLOOD	Turpiinirakennuksessa VC-putken murtuma. VC järjestelmän vuodot jaetaan kolmeen kokoluokkaan vedenpinnankorkeuden perusteella. VC1 on pienin, "vuoto". Vedenpinta nousee välille (-3; -0,2). Tason -3 alapuolella ei ole merkittäviä tulvan takia hajoavia laitteita, joten VC1 tulvia pienempiä vuotoja ei huomioida käytettävyyssmallissa suurena riskinä.	PRA: 2 viikkoa painotus 10%; Loviisa: 3 viikkoa painotus 90%	0,056	Kyllä	1,07E-02	2,44E-05	RS
VC2FLOOD	Turpiinirakennuksessa VC-putken murtuma, "suuri vuoto". Vesi nousee RV pumppujen asennustason yläpuolelle (-0,2) mutta ei nouse yli tulvakynnysten (+1,0). Päälauhde- ja laitoslisävesipumput sekä konventionaalisen välijäähdytyspiirin (VG) pumput jäävät veden alle.	PRA: 6 kuukautta painotus 10%; Loviisa: 3 kuukautta painotus 90%	0,275	Kyllä	2,44E-03	2,21E-03	RS
VC3FLOOD	Turpiinirakennuksessa VC-putken murtuma, "erittäin suuri vuoto". Vedenpinta nousee tulvakynnysten +1,0 yläpuolelle. Reaktorirakennuksessa veden alle jäävät molemmat hätäjäähdytyspumppuhuoneet ja pääkiertopumppujen tiivistevesijärjestelmä.	1 vuosi	1	Kyllä	4,29E-06	5,34E-08	RS

²³ 30.9.2015 2015 voimassa oleva Lo1 yksikön käyttöiän loppu: 31.12.2027 (Sipola & Nuutinen, 2014). 6,13 vastaa puolta loppukäyttöiästä vuosissa.

Taulukko L2-5. Tuotantotappioiden tiedot - muut suuret. Sisältää tuotantotappion yleiset tiedot, keskimääräiset korjaus- ja vikaantumisaajat ja lähteen keskimääräisille korjaus- ja vikaantumisajoille sekä tiedon huomiointitavasta. Tässä listataan myös alkutapahtumat joita ei huomioida ja huomiointi -kohdassa ilmoitetaan syy.

Alkutapahtuma	Tietoja alkutapahtumasta	Korjausseinoksin pituus	Korjausseinokki (a)	Huomiointi	Tehoajan vikataajuus	Seisokin vikataajuus	Vikataajuuden lähde
SEAL1.5	Meriveden pinta yli +1,5 m. Ei huomioida alkutapahtumana PRA-mallissa koska tästä mahdollisesti aiheutuvan syöttöveden menetyksen ja pikasulun arvioidaan kuuluvan sisäisten alkutapahtumien analyysiin. PRA pääraportin arvioiden mukaan vedenpinta saattaa nousta turpiinirakennuksessa tasolle -0.2 meriveden poistoreittien kautta eri järjestelmien toimiessa virheellisesti. Tulvat SEAL1.5:ssa arvioidaan harvinaisiksi eikä niitä huomioida.	-	-	Ei huomioida, harvinainen	0	0	-
ISEAL_VC2	VC2FLOOD alkutapahtumaa vastaava tulva korkean merenpinnan aiheuttamana. Seurausta alkutapahtumista SEAL2 ja SEAL2.5 tiettyjen turvatoimien epäonnistuessa.	6 kuukautta	0,5	Kyllä	5,10E-08	2,15E-07	RS
ISEAL_VC3	VC3FLOOD alkutapahtumaa vastaava tulva korkean merenpinnan aiheuttamana. Seurausta alkutapahtumista SEAL2 ja SEAL2.5 tiettyjen turvatoimien epäonnistuessa.	1 vuosi	1	Kyllä	2,89E-08	1,21E-07	RS
SEAL3	Meriveden pinta yli +3 m. Tulva laitosalueella ei ole estettävissä, vesi tulvii ovista ja ikkunoista. Varahätäsyöttövesipumppaamo säilyy toimintakykyisenä tulvasuojauksien ansiosta.	1 vuosi	1	Kyllä	8,91E-06	1,49E-09	AT
SEAL4	Meriveden pinta yli +3,5 m. Tulva laitosalueella ei ole estettävissä, vesi tulvii ovista ja ikkunoista. Myös hätäsyöttövesipumppaamo menetetään mistä aiheutuu suoraan sydänvaurio.	Ydinvoimalaitoksen loppukäyttöikä	-	Sydänvaurio	0	0	-

WIND45	Tuulenvoimakkuus 45,5 m/s ylittää ei kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet ottaen huomioon varmuuskertoimen 1,6. PRA-mallissa huomioidaan ilmastointipiipun kaatuminen ja turpiinihallin hajoaminen. PRA-mallissa alkutapahtuma johtaa suoraan sydänvaurioon. Pienempien tuulten aiheuttamien vaurioiden arvioidaan kuuluvan komponenttivikoihin.	Ydinvoimalaitoksen loppukäyttöikä	-	Sydänvaurio	0	0	-
LIGHTA	Automaatiohäiriöitä, toisen redundanssin menetys ukkosen takia.	2 viikkoa	0,0385	Kyllä	4,27E-06	1,89E-06	AT
LIGHTB	Automaatiohäiriöitä, molempien redundanssin menetys ukkosen takia. Arvioitu johtavan suoraan sydänvaurioon.	Ydinvoimalaitoksen loppukäyttöikä		Sydänvaurio	0	0	AT
ALGAE	Initiator: Algae on the sea. Aallot irrottavat suuria levä- ja kasvimassoja, jotka voivat ajautua jäähdytysvesikanavaan. Huomioi myös yhteisvaikutuksen tuulten ja lumen kanssa, alkutapahtumat ALW28, ALW39, ALSNW28, ALSNW39.	PRA: 8 viikkoa; Loviisa: 1 viikko; Aiempi arvio: 7 viikkoa; keskiarvo kaikista	0,103	Kyllä	1,14E-03	1,39E-04	RS
FRICE	Initiator: Frazil ice. Suppoa (jää / hyytynyt vesi) voi esiintyä huomattavia määriä Loviisan jäähdytysveden ottoaukkoa vastaavassa syvyydessä, jolloin suppo saattaa tukkia karkeavälpät, hienovälpät ja/tai koriketusodattimet. Huomioi myös yhteisvaikutuksen tuulten ja lumen kanssa, alkutapahtumat FRW28, FRW39, FRSNW28, FRSNW39.	PRA: 8 viikkoa; Loviisa: 1 viikko; Aiempi arvio: 7 viikkoa; keskiarvo kaikista	0,103	Kyllä	2,20E-02	0,00E+00	RS
OILSLICK	Initiator: Oil slick on the sea. Öljylautta ottoaukolla ja öljyntorjunta epäonnistuu. Öljy tai muu tahraava kemikaali tukkii koriketusodattimet, TF-lämmönvaihtimet ja dieselgeneraattorien jäähdytysveden lämmönvaihtimet	PRA: 8 viikkoa; Loviisa: 1 kuukausi; Aiempi arvio 7 viikkoa; keskiarvo kaikista	0,124	Kyllä	1,88E-04	1,67E-05	RS
SNW28	Initiator: Snow storm and wind (>28 m/s)	-	-	Ei huomioida, nopea korjata	0	0	-
SNW39	Initiator: Snow storm and wind (>39 m/s)	-	-	Ei huomioida, nopea korjata	0	0	-
SEISMIC	Initiator: Earthquake (PGA 0,04...0,07 g). Maanjäristysten aiheuttamat vauriot arvioidaan harvinaisiksi eikä niitä huomioida käytettävyyksessä	-	-	Ei huomioida, harvinainen	0	0	-

Sydänvaurio	Sydänvaurio. Sisältää kaikkien alkutapahtumien epäkäytettävyyden mikä aiheutuu sydänvauriosta. Osasta alkutapahtumia aiheutuu suoraan sydänvaurio, näitä alkutapahtumia ei huomioida erikseen.	Ydinvoimalaitoksen loppukäyttöikä	6,13 ²⁴	Kyllä	1,24E-05	1,06E-05	CDF ²⁵
-------------	--	-----------------------------------	--------------------	-------	----------	----------	-------------------

Taulukko L2-6. Suurten riskien mallin ja yleismallin tuotantotappiotiedot tuotantotappioiden suuruusjärjestyksessä. Sisältää vikakokonaisuuden johon tuotantotappio kuuluu, paikka käytettävyyshlokkokaaviossa, tehon tuotantotappion aikana, tuotantotappion epäkäytettävyyden ja tuotantotappioiden aiheuttamat osuudet kokonaistuotantotappioista yleismallissa ja suurten riskien mallissa sekä koko vuonna että tehoajolla. Käytettävyyshlokkokaavion paikalla tarkoitetaan kohtaa mihin tuotantotappio on mallinnettu yleismallin käytettävyyshlokkokaaviossa. Yleismallin käytettävyyshlokkokaaviot löytyvät liitteestä 1.

Vika-kokonaisuus	Paikka käytettävyys-lohko-kaaviossa	Tuotantotappio	Teho tuotantotappion aikana	Tuotantotappion epäkäytettävyys	Yleismalli, tuotantotappion osuus kokonaistuotantotappiosta	Yleismalli, tuotantotappion osuus tehoajon tuotantotappiosta	Suuret riskit, tuotantotappion osuus kokonaistuotantotappiosta	Suuret riskit, tuotantotappion osuus tehoajon tuotantotappiosta
Vuosihuolto	Muut	vuosihuolto	0,0%	5,72E-02	83,62%	- ²⁶	60,54%	-
Palot	Suuret riskit	S	0,0%	1,14E-02	-	-	12,04%	30,51%
Venytyssajo	Muut	venyt	94,0%	3,62E-03	5,28%	32,23%	3,82%	9,69%
Palot	Suuret riskit	E	0,0%	3,20E-03	-	-	3,39%	8,59%
Palot	Suuret riskit	A	0,0%	2,61E-03	-	-	2,76%	6,99%
Muut suuret	Suuret riskit	FRICE	0,0%	2,25E-03	-	-	2,38%	6,03%
YD	Reaktorin jäähdytys ja höyryntuotto - muut	YDsulku	0,0%	1,35E-03	1,98%	12,07%	1,43%	3,63%
Tehonsäätö	Muut	saato	75,0%	1,26E-03	1,83%	11,19%	1,33%	3,36%
Tulvat	Suuret riskit	VC2FLOOD	0,0%	1,24E-03	-	-	1,31%	3,31%
RL	Syöttövesijärjestelmä	RLsulku	0,0%	9,09E-04	1,33%	8,1%	0,961 %	2,43%

²⁴ 30.9.2015 voimassa oleva Lo1 yksikön käyttöiän loppu: 31.12.2027 (Sipola & Nuutinen, 2014). 6,13 vastaa puolta loppukäyttöiästä vuosissa.

²⁵ CDF: Sydänvauriotaajuus Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n tuloksista (Jänkäla, et al., 2014b).

²⁶ -: kyseistä arvoa ei ole.

YS	Reaktori	YSSulku	0,0%	8,67E-04	1,27%	7,73%	0,917 %	2,32%
Palot	Suuret riskit	TM	0,0%	7,99E-04	-	-	0,845 %	2,14%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	LIRV	0,0%	6,84E-04	-	-	0,724 %	1,83%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	PLSW (TLSW)	0,0%	6,58E-04	-	-	0,695 %	1,76%
Tulvat	Suuret riskit	VC1FLOOD	0,0%	5,97E-04	-	-	0,632 %	1,6%
Muut suunnitellut	Muut	muusuunn	50,0%	5,87E-04	0,86%	5,23%	0,620 %	1,57%
YA	Reaktorin jäähdytys ja höyryntuotto - muut	YAsulku	0,0%	5,72E-04	0,84%	5,1%	0,605 %	1,53%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	PLOCA	0,0%	3,45E-04	-	-	0,365 %	0,93%
SP	Turpiini SA50	SP50	50,0%	2,53E-04	0,37%	2,26%	0,268 %	0,68%
SP	Turpiini SA10	SP10	50,0%	2,44E-04	0,36%	2,17%	0,258 %	0,65%
Primääripiirin I&C	Primääripiirin ohjaus ja instrumentointi	ohjauss	0,0%	2,21E-04	0,32%	1,97%	0,233 %	0,59%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	XXSLOCA	0,0%	2,10E-04	-	-	0,222 %	0,56%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	SLOCA	0,0%	2,05E-04	-	-	0,217 %	0,55%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	LOP	0,0%	1,97E-04	-	-	0,208 %	0,53%
RAkoest	Muut	RAkoest	84,0%	1,77E-04	0,26%	1,58%	0,187 %	0,47%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	SGTR	0,0%	1,74E-04	-	-	0,183 %	0,46%
Reaktori	Reaktori	pikasulku	0,0%	1,68E-04	0,25%	1,5%	0,178 %	0,45%
SA	Turpiini SA10	SA10	50,0%	1,58E-04	0,23%	1,41%	0,167 %	0,42%
SA	Turpiini SA50	SA50	50,0%	1,57E-04	0,23%	1,4%	0,166 %	0,42%
Muut suuret	Suuret riskit	Sydänvaurio	0,0%	1,41E-04	-	-	0,149 %	0,38%
Turvajärjestelmät	Turvajärjestelmät	turvas	0,0%	1,35E-04	0,2%	1,21%	0,143 %	0,36%
Muut suuret	Suuret riskit	ALGAE	0,0%	1,28E-04	-	-	0,135 %	0,34%
YP	Reaktorin jäähdytys ja höyryntuotto - muut	YPSulku	0,0%	1,27E-04	0,19%	1,13%	0,134 %	0,34%
Palot	Suuret riskit	TB2	50,0%	1,16E-04	-	-	0,123 %	0,31%
Palot	Suuret riskit	TG2	50,0%	1,16E-04	-	-	0,123 %	0,31%

Suuret sisäiset	Suuret riskit	XSLOCA	0,0%	9,08E-05	-	-	0,096 %	0,24%
Palot	Suuret riskit	B	0,0%	7,81E-05	-	-	0,083 %	0,21%
Palot	Suuret riskit	R	0,0%	7,72E-05	-	-	0,082 %	0,21%
Palot	Suuret riskit	T-muut	0,0%	6,32E-05	-	-	0,067 %	0,17%
SA	Sekundääripiiri muut	SArjoit	80,0%	5,81E-05	0,08%	0,52%	0,061 %	0,16%
Palot	Suuret riskit	CT	0,0%	5,76E-05	-	-	0,061 %	0,15%
Palot	Suuret riskit	M	0,0%	5,68E-05	-	-	0,060 %	0,15%
Palot	Suuret riskit	Q	0,0%	5,52E-05	-	-	0,058 %	0,15%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	PCPLOCA	0,0%	5,46E-05	-	-	0,058 %	0,15%
Palot	Suuret riskit	PV	0,0%	5,16E-05	-	-	0,055 %	0,14%
Tulvat	Suuret riskit	VFRFLOOD	0,0%	4,88E-05	-	-	0,052 %	0,13%
Palot	Suuret riskit	TB1	0,0%	4,65E-05	-	-	0,049 %	0,12%
Palot	Suuret riskit	TG1	0,0%	4,64E-05	-	-	0,049 %	0,12%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	LLOCA	0,0%	3,92E-05	-	-	0,041 %	0,11%
Suuret sisäiset	Suuret riskit	LSGTR	0,0%	3,42E-05	-	-	0,036 %	0,092 %
YD	YDpumput	YD1116	83,33%	3,37E-05	0,05%	0,3%	0,036 %	0,090 %
YD	YDpumput	YD1116	83,33%	3,36E-05	0,05%	0,3%	0,036 %	0,090 %
YD	YDpumput	YD1116	83,33%	3,36E-05	0,05%	0,3%	0,036 %	0,090 %
YD	YDpumput	YD1116	83,33%	3,33E-05	0,05%	0,3%	0,035 %	0,089 %
RM	Sekundääripiiri muut	RMmuu	75,0%	3,32E-05	0,05%	0,3%	0,035 %	0,089 %
YD	YDpumput	YD1116	83,33%	3,31E-05	0,05%	0,29%	0,035 %	0,089 %
YD	YDpumput	YD1116	83,33%	3,29E-05	0,05%	0,29%	0,035 %	0,088 %
Apujärjestelmät	Apujärjestelmät	apu	0,0%	2,98E-05	0,04%	0,27%	0,032 %	0,080 %
RD/RH	Sekundääripiiri muut	RD	95,0%	2,53E-05	0,04%	0,23%	0,027 %	0,068 %
Muut suuret	Suuret riskit	OILSLICK	0,0%	2,50E-05	-	-	0,026 %	0,067 %
Palot	Suuret riskit	D	0,0%	2,50E-05	-	-	0,026 %	0,067 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	MSGTR	0,0%	1,89E-05	-	-	0,020 %	0,051 %
Reaktori	Reaktori	osateho	90,0%	1,76E-05	0,03%	0,16%	0,019 %	0,047 %

RL	Syöttövesi-järjestelmä	RL	25,0%	1,70E-05	0,02%	0,15%	0,018 %	0,046 %
Palot	Suuret riskit	PCP	0,0%	1,66E-05	-	-	0,018 %	0,044 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	LOOP	0,0%	1,54E-05	-	-	0,016 %	0,041 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	LEAK	0,0%	1,30E-05	-	-	0,014 %	0,035 %
Tulvat	Suuret riskit	RVFLOOD	0,0%	1,21E-05	-	-	0,013 %	0,032 %
Tulvat	Suuret riskit	UJFLOOD	0,0%	1,14E-05	-	-	0,012 %	0,031 %
Palot	Suuret riskit	T-RC	0,0%	1,08E-05	-	-	0,011 %	0,029 %
VC	VC52	VC52	75,0%	1,01E-05	0,01%	0,09%	0,011 %	0,027 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	SMLOCA	0,0%	9,82E-06	-	-	0,010 %	0,026 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	XLLOCA	0,0%	9,82E-06	-	-	0,010 %	0,026 %
VC	VC12	VC12	75,0%	9,75E-06	0,01%	0,09%	0,010 %	0,026 %
Tulvat	Suuret riskit	TDFLOOD	0,0%	9,14E-06	-	-	0,010 %	0,025 %
Palot	Suuret riskit	DS	0,0%	9,08E-06	-	-	0,010 %	0,024 %
Muut suuret	Suuret riskit	SEAL3	0,0%	8,91E-06	-	-	0,009 %	0,024 %
Tulvat	Suuret riskit	IRLFL00CFK	0,0%	8,64E-06	-	-	0,009 %	0,023 %
Palot	Suuret riskit	K	0,0%	7,83E-06	-	-	0,008 %	0,021 %
VC	VC51	VC51	75,0%	7,06E-06	0,01%	0,06%	0,007 %	0,019 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	MLOCA	0,0%	6,18E-06	-	-	0,007 %	0,017 %
Tulvat	Suuret riskit	VFFLOOD	0,0%	5,95E-06	-	-	0,006 %	0,016 %
Tulvat	Suuret riskit	RLFL00D	0,0%	4,74E-06	-	-	0,005 %	0,013 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	ATWS	0,0%	4,46E-06	-	-	0,005 %	0,012 %
Tulvat	Suuret riskit	VC3FLOOD	0,0%	4,34E-06	-	-	0,005 %	0,012 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	ALOCA	0,0%	4,02E-06	-	-	0,004 %	0,011 %
RM	Lauhde-järjestelmä 1	RM1	75,0%	3,78E-06	0,01%	0,03%	0,004 %	0,010 %
RM	Lauhde-järjestelmä 2	RM2	75,0%	3,76E-06	0,01%	0,03%	0,004 %	0,010 %
VC	VC11	VC11	75,0%	2,73E-06	0,0%	0,02%	0,003 %	0,007 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	XSVLOCA	0,0%	2,30E-06	-	-	0,002 %	0,006 %
Tulvat	Suuret riskit	THFLOOD	0,0%	2,20E-06	-	-	0,002 %	0,006 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	YB	0,0%	2,32E-07	-	-	0,000 %	0,001 %

Muut suuret	Suuret riskit	LIGHTA	0,0%	2,01E-07	-	-	0,000 %	0,001 %
Muut suuret	Suuret riskit	ISEAL_VC3	0,0%	1,47E-07	-	-	0,000 %	0,000 %
Muut suuret	Suuret riskit	ISEAL_VC2	0,0%	1,29E-07	-	-	0,000 %	0,000 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	SVLOCA	0,0%	4,09E-08	-	-	0,000 %	0,000 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	VLOCA	0,0%	4,09E-08	-	-	0,000 %	0,000 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	LDGP	0,0%	9,72E-09	-	-	0,000 %	0,000 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	DROP	0,0%	1,98E-10	-	-	0,000 %	0,000 %
Suuret sisäiset	Suuret riskit	SLB	0,0%	0,00E+00	-	-	0,000 %	0,000 %

Liite 3

Analyyttisen käytettävyysslaskennan virhe

Taulukko L3-1. Käytettävyyden virhe ja laskennan välivaiheet kahden identtisen komponentin sarjaankytkennässä luvussa 3.3.2. Korjaustaajuus on 1 yksikkö.

Yksittäinen komponentti		Kaksi identtistä komponenttia sarjassa					
Vikaantumistaajuus / korjaustaajuus	Käytettävyys	Vikaantumistaajuus	Korjaustaajuus	Korjaustaajuus (appr.)	Käytettävyys	Käytettävyys (appr.)	Käytettävyyden virhe (appr. - tarkka)
1,00E-08	1,0000000	2,00E-08	1,00E+00	1,00E+00	1,0000000	1,0000000	0,0000000
3,16E-08	1,0000000	6,32E-08	1,00E+00	1,00E+00	0,9999999	0,9999999	0,0000000
1,00E-07	0,9999999	2,00E-07	1,00E+00	1,00E+00	0,9999998	0,9999998	0,0000000
3,16E-07	0,9999997	6,32E-07	1,00E+00	1,00E+00	0,9999994	0,9999994	0,0000000
1,00E-06	0,9999990	2,00E-06	1,00E+00	1,00E+00	0,9999980	0,9999980	0,0000000
3,16E-06	0,9999968	6,32E-06	1,00E+00	1,00E+00	0,9999937	0,9999937	0,0000000
1,00E-05	0,9999900	2,00E-05	1,00E+00	1,00E+00	0,9999800	0,9999800	0,0000000
3,16E-05	0,9999684	6,32E-05	1,00E+00	1,00E+00	0,9999368	0,9999368	0,0000000
1,00E-04	0,9999000	2,00E-04	1,00E+00	1,00E+00	0,9998000	0,9998000	0,0000000
3,16E-04	0,9996839	6,32E-04	1,00E+00	1,00E+00	0,9993678	0,9993679	0,0000001
1,00E-03	0,9990010	2,00E-03	1,00E+00	1,00E+00	0,9980030	0,9980040	0,0000010
3,16E-03	0,9968477	6,32E-03	9,98E-01	1,00E+00	0,9937053	0,9937152	0,0000099
1,00E-02	0,9900990	2,00E-02	9,95E-01	1,00E+00	0,9802960	0,9803922	0,0000961
3,16E-02	0,9693466	6,32E-02	9,84E-01	1,00E+00	0,9396328	0,9405165	0,0008837
1,00E-01	0,9090909	2,00E-01	9,52E-01	1,00E+00	0,8264463	0,8333333	0,0068871
3,16E-01	0,7597469	6,32E-01	8,63E-01	1,00E+00	0,5772154	0,6125741	0,0353587

Liite 4

Vuosihuoltojen kestot

Taulukko L4-1. Loviisan ensimmäisen ydinvoimalaitosyksikön vuosihuoltojen kestot päivän tarkkuudella vuosilta 1981 - 2014 ja näiden keskiarvo.

Vuosi	Kesto (d)	Vuosi	Kesto (d)
1981	28	1998	23
1982	34	1999	20
1983	39	2000	44
1984	48	2001	21
1985	22	2002	29
1986	23	2003	24
1987	22	2004	48
1988	61	2005	17
1989	24	2006	26
1990	47	2007	20
1991	28	2008	51
1992	67	2009	17
1993	42	2010	25
1994	23	2011	17
1995	19	2012	55
1996	65	2013	16
1997	30	2014	24
		Keskiarvo	32,3